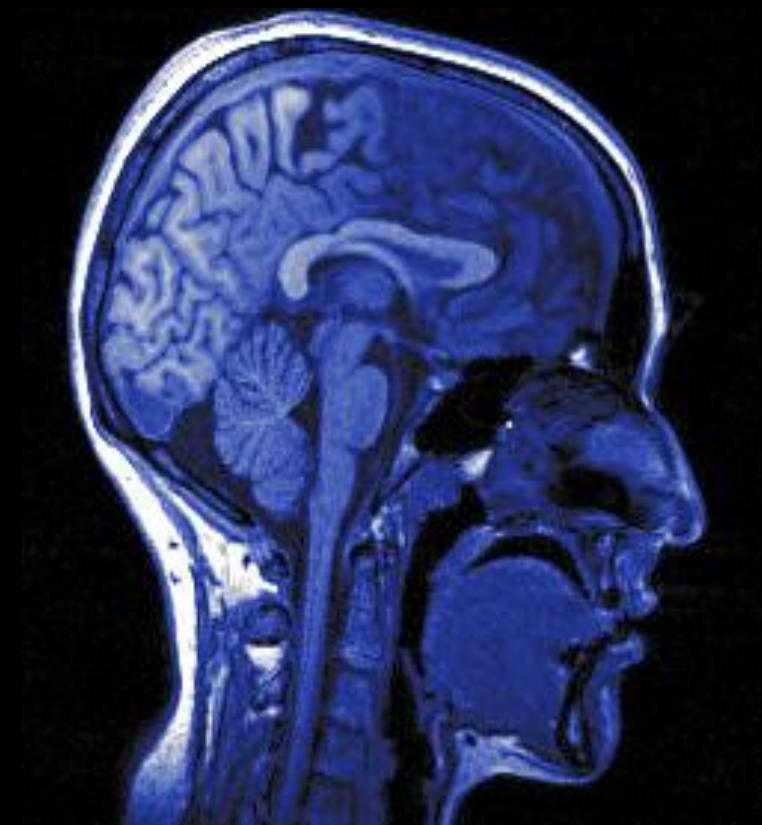




Septiembre 2013 TESIS DOCTORAL AINA RODRÍGUEZ PUJADAS

# ***Bases Cerebrales de Control Cognitivo en Bilingüismo***



Tesis doctoral presentada por:  
**Aina Rodríguez Pujadas**  
Director: Dr. César Ávila Rivera



Programa de doctorado en Psicopatología, Salud y Neuropsicología



*Departamento de Psicología Básica, Clínica y Psicobiología  
Facultad de Ciencias de la salud*



***Bases Cerebrales de Control Cognitivo en  
Bilingüismo***

Tesis Doctoral presentada por:

***Aina Rodríguez Pujadas***

Para obtener el grado de doctor por la Universitat Jaume I de Castellón

Director de Tesis:

Dr. César Ávila Rivera

Programa de Doctorado ***Psicopatología, Salud y Neuropsicología***

Castellón, Septiembre 2013



*A la meva família,*

*amb amor...*



## **Agradecimientos**

En primer lugar quiero dar las gracias a mi director de tesis, el Dr. César Ávila, por posibilitarme formar parte de su grupo de investigación e introducirme en el estudio de la resonancia magnética funcional aplicada a la neuropsicología. Gracias César, por ser el motor de este laboratorio y, sobretodo, por haberme dedicado tu tiempo y conocimientos, que han sido pilares básicos para mí durante todo este proceso.

En segundo lugar, quiero agradecer a la doctora Ana Sanjuán todo lo que me ha enseñado, puesto que su ayuda en los aspectos metodológicos ha sido un factor clave para el desarrollo de esta tesis. Gracias también a la doctora Noelia Ventura, por su paciencia y la sencillez con la que me ha enseñado complejas cuestiones de análisis estadístico en neuroimagen.

También quiero dar las gracias a la doctora Cristina Forn y al doctor Alfonso Barrós, por compartir conmigo sus conocimientos y consejos; así como a mis compañeros de laboratorio: Paola, Patri, Marian, Elisenda, Víctor y Javi Panach, por toda la motivación y frescura que aportan al grupo. Finalmente, quiero expresar mi mayor gratitud a Juan Carlos, Javi y Alberto por regalarme su amistad; su apoyo durante todo este tiempo ha sido esencial para mí.

Y por último, pero por encima de todo, quiero agradecer el apoyo incondicional de mi familia, a quienes les debo todo. Us estimo.





# INDICE

Prefacio.....	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
1.1. Control Cognitivo.....	3
1.1.1. Introducción.....	3
1.1.2. Paradigmas de estudio.....	4
1.1.2.1. El procesamiento del conflicto.....	4
1.1.2.2. La alternancia entre tareas.....	5
1.1.2.3. Inhibición de respuesta.....	8
1.1.2.4. Modelo de control dual.....	9
1.1.3. Bases Neurales.....	9
1.1.3.1. Función ejecutiva.....	9
1.1.3.2. Tareas de alternancia e inhibición de respuesta.....	11
1.2. Control Cognitivo en el Bilingüismo.....	19
1.2.1. Mitología y bilingüismo.....	19
1.2.2. Estudios conductuales de control lingüístico.....	21
1.2.3. Estudios conductuales de control cognitivo.....	23
1.2.4. Estudios cerebrales de control lingüístico.....	30
1.2.5. Estudios cerebrales de control cognitivo.....	33
CAPÍTULO 2. SECCIÓN EXPERIMENTAL.....	35
2.1. Síntesis Teórica.....	35
2.2. Objetivos y planteamiento.....	38
2.3. Metodología.....	39
2.4. Hipótesis.....	41
2.4.1. Generales.....	41
2.4.2. Específicas.....	41

2.5.	Garbin G, Sanjuan A, Forn C, Bustamante JC, Rodríguez-Pujadas A, et al. (2011): Bridging language and attention: Brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. Neuroimage, 119: 129-135.....	43
2.6.	Rodríguez-Pujadas A, Sanjuán A, Ventura-Campos N, et al. (2013): Bilinguals use language-control brain areas more than monolinguals to perform non-linguistic switching tasks. PLoS ONE 8(9): e73028. doi:10.1371/journal.pone.0073028.....	44
2.7.	Rodríguez-Pujadas A, Sanjuán A, Fuentes Paola, et al. (sometido, Hum Brain Mapp): Differential neural control in early bilinguals and monolinguals during response inhibition.....	45
CAPITULO 3. DISCUSIÓN GENERAL.....		46
3.1.	Conclusiones y aportaciones originales.....	54
CAPITULO 4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....		56
CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA.....		57
ANEXO.....		71

## **PREFACIO**

### *Justificación*

Nos hallamos inmersos en una sociedad que cada día es más y más multicultural, lo que implica un importante aumento del número de personas que son capaces de hablar, de manera fluida, más de una lengua. Inevitablemente, en este contexto aparecen multitud de preguntas relacionadas con los posibles efectos colaterales del bilingüismo. Mediante esta tesis, se pretende dar algunas respuestas empíricas que permitan llegar a una mejor comprensión del impacto del bilingüismo sobre los procesos generales de control ejecutivo que no están directamente relacionados con el procesamiento del lenguaje. De esta manera, teniendo en cuenta la constante necesidad de los bilingües de controlar ambas lenguas desde la infancia durante la comprensión y producción del habla, el potencial impacto del bilingüismo sobre los procesos generales de control ejecutivo ha pasado a ser un tema de gran actualidad.

La hipótesis general de la que parten estos estudios es que los bilingües, en comparación con los monolingües, ejercen un control ejecutivo adicional durante la producción del habla, para asegurar que ésta se dé únicamente en la lengua deseada. Esto supondría una especie de sobre-entrenamiento en la utilización de mecanismos de control ejecutivo, que propiciaría un funcionamiento distinto de la red de control ejecutivo en los bilingües que en los monolingües, que afectaría incluso a tareas no directamente relacionadas con el lenguaje. De este modo, en el caso de que la hipótesis planteada sea verificada, los bilingües evidenciarían un sistema de control cerebral distinto

(más vinculado a la lengua) en la realización de tareas de control ejecutivo no lingüísticas.

Los primeros estudios con bilingües en este campo fueron llevados a cabo por la doctora Bialystok y su equipo, en Canadá. Estas investigaciones iniciales evidenciaron efectos colaterales del bilingüismo especialmente relevantes en las etapas de desarrollo (infancia) y el deterioro (mediana edad y vejez) del sistema ejecutivo. Posteriormente, dichos efectos fueron hallados en adultos tempranos, que se encuentran en el punto más álgido de desarrollo de las funciones ejecutivas (Costa y cols., 2008).

Mediante la realización de esta tesis se examinarán los potenciales efectos del bilingüismo a través de distintas tareas ejecutivas. Hasta la fecha, muy pocas investigaciones se han centrado en el estudio del impacto del bilingüismo en los procesos cerebrales de control ejecutivo que no están directamente relacionados con el procesamiento del lenguaje. Este hecho sorprende, dado que una de las habilidades más importantes del bilingüe es la facilidad con la que manejan de manera continua la alternancia entre dos lenguas. Esto es especialmente evidente en ciertas comunidades en las que hay dos lenguas oficiales que son habladas con la misma frecuencia; como es el caso de la Comunidad Valenciana, en España. En esta comunidad, como en otras con la misma característica, no es infrecuente ver a los hablantes cambiando de una lengua a otra mientras, alternativamente, se dirigen a un interlocutor predominantemente en catalán o en castellano. Esta frecuente alternancia entre lenguas de los bilingües, genera la cuestión de si los bilingües evidencian diferencias a nivel conductual o funcional, en tareas similares no lingüísticas, cuando se los compara con los monolingües.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

### **1.1 CONTROL COGNITIVO**

#### **1.1.1 Introducción**

En el día a día modificamos nuestra conducta en función de claves contextuales, lo que hace que el estudio de los mecanismos subyacentes a procesos de control cognitivo sea un tema de gran actualidad en neurociencia cognitiva. Así, la capacidad de generar comportamientos adecuados a situaciones cambiantes requiere comprender las reglas generales que guían la asociación estímulo-respuesta, mantener el repertorio de conductas adecuado, seleccionar la respuesta más apropiada entre las posibles e inhibir las preponderantes e inapropiadas a la tarea. Al mismo tiempo, implican procesos de atención, memoria de trabajo, alternancia entre sets mentales, búsqueda organizada, flexibilidad de acción y pensamiento (Fuster, 1980; Logan, 1985; Luria, 1973; Stuss y Benson, 1984, 1987).

De este modo, el control y la regulación de la conducta surgirían de la combinación entre varios de los procesos implicados en la conducta dirigida a las metas, lo que dificulta enormemente la diferenciación entre los procesos de control ejecutivo implicados. La forma en que tradicionalmente se han estudiado estos procesos cognitivos es mediante la aplicación de paradigmas experimentales que dividen el procesamiento general en procesos individuales y mucho más concretos. Dos de los paradigmas clásicamente utilizados para el

estudio de las funciones ejecutivas son el de alternancia entre tareas distintas pero con demandas cognitivas similares y el de inhibición de respuesta.

### 1.1.2 Paradigmas de estudio

#### 1.1.2.1 *El procesamiento del conflicto*

Uno de los procesos de control ejecutivo más estudiados es el procesamiento del conflicto entre dos respuestas competidoras. Diariamente nos exponemos a situaciones que implican funciones de procesamiento del conflicto. Por ejemplo, ante una señal de tráfico localizada a la izquierda y que indica que debes girar a la derecha puede darse un conflicto entre respuestas: girar a la derecha (correcta) o a la izquierda (conflicto elicitado por la localización de la señal de tráfico). Desde un punto de vista experimental, los procesos de resolución del conflicto han sido ampliamente investigados mediante diversas tareas entre las que destacan las del tipo *Stroop*, que requieren la implicación de procesos de control ejecutivo para resolver la competición entre dos alternativas de respuesta. Por ejemplo, en la versión clásica de la tarea *Stroop*, la de palabra-color, el participante debe nombrar el color en el que está impresa la palabra mientras ignora el significado de la propia palabra.

A nivel conductual, los procesos de monitorización del conflicto se estudiarían, principalmente, de dos maneras distintas. Una de ellas se basa en el análisis del *mixing cost*, evidenciado por respuestas más lentas en contextos con proporciones similares de ensayos incongruentes y congruentes (con conflicto y sin conflicto, respectivamente), que aquellos en los que predomina un tipo de ensayo (congruente o incongruente). De este modo, el *mixing cost*

reflejaría el tiempo invertido en realizar ciertos ajustes conductuales para alternar, de una manera más eficiente, entre ambos tipos de ensayos.

Otra de las formas de evaluación del monitoreo del conflicto se basa en el análisis, ensayo por ensayo, de los ajustes conductuales. Para ello se parte de la premisa de que la respuesta a un determinado ensayo será más costosa si el ensayo inmediatamente anterior ha sido de otro tipo (ensayo de cambio), que si ha sido del mismo (ensayo de repetición); dado que en el ensayo de cambio el participante debe realizar pequeños ajustes conductuales para desvincular los mecanismos de resolución del conflicto implicados en el ensayo previo. La diferencia entre los ensayos de cambio y de repetición se conoce como *switch cost* y es mayor en contextos con proporciones desequilibradas entre ensayos congruentes e incongruentes. Por ejemplo, un contexto experimental con la mayoría de ensayos congruentes requerirá procesos de resolución del conflicto, únicamente, en una pequeña parte de la tarea. Sin embargo, el esfuerzo requerido para dar estas respuestas será mayor que si el conflicto aparece de manera más frecuente, ya que cuando la proporción de ensayos incongruentes es elevada, los mecanismos de resolución del conflicto están preparados y su aplicación es menos costosa.

#### 1.1.2.2 La alternancia entre tareas

Diariamente realizamos actividades que requieren la realización de cambios frecuentes entre tareas. Por ejemplo, un estudiante está repasando sus apuntes en casa. De repente, suena el teléfono: es un amigo preguntándole si le apetece salir un rato al parque. El estudiante piensa, rápidamente coge su agenda y comprueba que no puede ir porque tiene hora al

dentista y ya llega tarde. Va a la cocina, llena un vaso de agua y se lo bebe, a continuación busca las llaves del coche mientras apaga el ordenador. La realización de esta secuencia de acciones (leer, escribir, hablar, recuperar de la memoria, procesos de búsqueda visual, etc.) requieren la ejecución de importantes saltos conductuales que, en este caso, son precipitados por la aparición de pistas contextuales. Así, la realización eficiente de muchas tareas cotidianas depende, entre otros factores, de la habilidad para alternar entre las distintas configuraciones estímulo-respuesta (E-R). Sin embargo, dicha alternancia entre tareas parece implicar un coste, llamado *switch cost*, que se evidencia en respuestas más lentas inmediatamente después de realizar un cambio en el repertorio conductual.

Los paradigmas experimentales de tareas de alternancia implican la alternancia entre dos o más tareas simples y con demandas cognitivas parecidas, en función de instrucciones asociadas a reglas de acción. Dichas reglas de acción pre-aprendidas son del tipo: “si... entonces” y gobiernan la asociación entre los estímulos y las respuestas motoras, con la finalidad de conseguir determinadas metas (Rubinstein y cols., 2001; Schneider y Logan, 2006).

Rogers y Monsell (1995) llevaron a cabo una serie de experimentos basados en el paradigma de alternancia para explorar los efectos de la preparación previa a la tarea. La tarea se basaba en la presentación simultánea de una letra y un número y los participantes debían responder unas veces en función de la letra (L) y otras del número (N). De este modo, el experimento consistía en la repetición de una secuencia formada por 4 ensayos: Letra-Letra-Número-Número; estos pares de estímulos (Letra y Número) se presentaban



en uno u otro cuadrante de la pantalla, lo que servía de pista a los participantes para conocer el criterio a seguir. Los resultados evidenciaron mayores tiempos de respuesta (TR) al cambiar entre condiciones distintas (de Letra a Número o al revés) que cuando se cambiaba entre dos condiciones iguales (de Letra a Letra o Número-Número). A este coste conductual (en TR y eficiencia) asociado al cambio entre condiciones, se le ha llamado *switch cost* conductual (Meiran, 1996; Monsell, 2003).

En un principio, Rogers y Monsell (1995) atribuyeron estos costes al tiempo invertido en reconfigurar las asociaciones estímulo-respuesta, por lo que pensaron que si dejaban el tiempo suficiente entre ensayos, el participante realizaría dichas reconfiguraciones antes del inicio del nuevo ensayo. Así, el valor del *switch cost* tendería a cero a medida que aumentase el tiempo preparatorio. Sin embargo, los resultados mostraron que aunque el *switch cost* se reducía a medida que aumentaba el tiempo de preparación antes del siguiente ensayo, nunca llegaba a desaparecer.

En base a sus resultados, Rogers y Monsell (1995) concluyeron que el *switch cost* estaba integrado por dos componentes diferenciados, uno que podía reducirse con la introducción de un periodo preparatorio y otro que no. Por una parte, el *local cost* se relacionaría con los propios procesos de alternancia entre tareas, es decir, con las operaciones cognitivas necesarias para lograr la reconfiguración del patrón de respuestas que permite cambiar de una tarea a otra de una manera efectiva; y por otra, el *restart cost* se asociaría con la intermitente y poco predecible reactivación del mismo set de respuesta.

Los estudios experimentales basados en este paradigma han evidenciado la complejidad de los procesos de alternancia entre tareas, que se ven afectados por multitud de factores (ej. lo predecibles que sean los cambios siguientes, la naturaleza de las tareas implicadas, la secuencia en sí de tareas, el tiempo disponible para la preparación previa al cambio) así como un importante número de efectos asociados (Monsell, 2003). En esta tesis se estudia el efecto que ejerce el bilingüismo en dos tareas de alternancia no lingüística, que permiten estudiar su efecto sobre procesos de control cognitivo reactivos y proactivos.

#### *1.1.2.3 Inhibición de respuesta*

Se llama Inhibición de Respuesta al proceso cognitivo requerido para cancelar o inhibir una acción ya planificada. Las formas más habituales de estudiar este proceso son las tareas *go-no go* y *la señal de stop* (Logan, 1994). Este tipo de tareas están compuestas por dos componentes: en la parte *go* el participante debe dar respuestas correctas en el menor tiempo posible e inhibirlas tanto en la *no go* (por ejemplo: responder presionando un botón cada vez que aparezca un círculo azul o gris, pero no si es amarillo) como ante la señal *stop* (no responder cuando suene un *bip*).

La diferencia entre ambos procedimientos es que en los ensayos *no go* en tareas de *la señal de stop* aparecen sucesivamente la señal de *go* y la de *stop*. Para este tipo de paradigmas el índice de control inhibitorio se extrae a partir del número de errores en la parte *no go* (respuestas dadas cuando no debería darse). En cambio, en las tareas con señales de *stop* se puede cuantificar la magnitud de tiempo necesario para inhibir a partir de la distancia

temporal entre la señal *go* y la *stop* para que la inhibición se produzca en un 50% de los casos. Este índice se denomina *TR a la señal de stop* (en inglés, *stop signal reaction time = SSRT*; Logan, 1994). En esta tesis se estudian las diferencias entre bilingües y monolingües en un paradigma manual de *señal de stop* (adaptado de Xue y cols., 2008), tanto a nivel conductual como funcional.

#### *1.1.2.4 Modelo de control dual de Braver*

Braver, en su modelo de control dual para tareas de control ejecutivo (Braver, 2012), postula la existencia de dos tipos de control cognitivo: el proactivo y el reactivo. El control proactivo se trataría de una especie de selección temprana y sostenida que optimizaría los procesos atencionales, perceptivos y motrices antes de la aparición de las demandas cognitivas, manteniendo activa la información relevante para las metas. A nivel cerebral, este tipo de control se vincularía al córtex prefrontal lateral. En cambio, el control reactivo se trataría de un mecanismo de corrección, tardío, transitorio y activado de manera precipitada, tras la detección de un evento que genere interferencia, dependiente del córtex prefrontal lateral y otra red más amplia que incluiría el cortex cingulado anterior y los ganglios basales. Esta distinción resulta relevante ya que los modos de control varían en función de las características de la tarea: el control proactivo se utiliza en tareas que requieren pocos recursos atencionales con acciones esporádicas de control ejecutivo, mientras que el control reactivo se requieren en tareas con continuos requerimientos de control ejecutivo.

### 1.1.3 Bases Neurales

#### 1.1.3.1 *Función ejecutiva*

A lo largo de la historia muchos investigadores han afirmado que el córtex prefrontal ejercía una función generalizada de control ejecutivo. Sin embargo, sigue existiendo controversia sobre la existencia de diferencias funcionales entre las distintas subregiones del córtex prefrontal. Un marco teórico influyente afirma que las distintas áreas dentro del córtex prefrontal realizarían la misma operación cognitiva (memoria de trabajo) pero para distintos *inputs* sensoriales (Goldman-Rakic, 1987; Rushworth y cols., 1997). Una variante ampliaría el papel del córtex prefrontal al control de *inputs* sensitivos y *outputs* motores (Miller y cols., 2001) mediante redes subcorticales y corticales posteriores (Stocco y cols., 2012).

Diversos estudios de neuroimagen confirmarían la implicación del circuito fronto-estriatal en la realización de funciones ejecutivas, por las activaciones halladas en esta área en tareas de alternancia (Rogers y cols., 2000), de inhibición de respuesta (tareas *go/nogo* y la *señal de stop*) (Rubia y cols., 1999, 2001) y en *Wisconsin Card Sorting Test* (WSCT) [en este paradigma el sujeto tiene que ordenar una serie de tarjetas con distintas dimensiones (color, número y forma) en base al criterio apropiado basado en las demandas contextuales] (Monchi y cols., 2001, Konishi y cols., 1998). En tareas de resolución de conflictos se ha visto activación bilateral en el córtex prefrontal dorsolateral, frontal inferior y cíngulo anterior dorsal (Duncan y Owen, 2000), y estudios neuropsicológicos relacionarían lesiones frontales con déficits en tareas de flexibilidad cognitiva, categorización estimular y

planificación (Milner, 1963; Robinson y cols., 1980; Shallice, 1982; Stuss, 1993). De modo que, evidencias teóricas, experimentales y clínicas atribuirían funciones de control ejecutivo al córtex prefrontal y a áreas interconectadas.

#### *1.1.3.2 Tareas de alternancia e inhibición de respuesta*

Los resultados de estudios realizados mediante el paradigma de alternancia y de inhibición de respuesta son diversos, aunque todos ellos apuntan a un importante papel de determinadas áreas del córtex prefrontal lateral en las funciones ejecutivas relacionadas con este tipo de tareas. Dos de los procesos implicados en las tareas de alternancia son el cambio y la inhibición. Investigaciones de neuroimagen han sugerido una base neural común a ambos procesos (Kenner y cols., 2010; Hedden y Gabrieli, 2010). Por ejemplo, en el estudio realizado por Kenner y su equipo (2010) se vieron activaciones en el giro frontal inferior, el cíngulo anterior y el mesencéfalo, tanto para ensayos de *stop* como de cambio.

Respecto al control inhibitorio, cabe tener en cuenta la existencia de diferentes tipos de procesos inhibitorios, ya que la distinta implicación de uno u otro podría dar lugar a discrepancias entre resultados experimentales. En un meta-análisis realizado por Nee y cols. (2007), se estudiaron las diferencias cerebrales entre tareas que implicaban diferentes tipos de procesos inhibitorios. Concretamente, se analizaron las diferencias entre las activaciones en tareas *go/nogo* (inhibición de respuestas preponderantes), de Flancos (inhibición de las propiedades perceptuales competitivas) y de alternancia (inhibición de correspondencias E-R). Los resultados evidenciaron activaciones comunes a todas las tareas en el córtex cíngulo anterior, el núcleo caudado, el córtex

prefrontal dorsolateral y el córtex parietal; y activaciones diferenciales asociadas con la tarea en áreas frontales, estriatales y parietales. A raíz de los resultados, los autores sugirieron que el sistema funcional inhibitorio implicaba la participación regular de un sistema nuclear formado por el córtex prefrontal lateral, el córtex cingulado anterior, el caudado y el córtex parietal. Junto a estas zonas, se activarían otras áreas en función de los requisitos inhibitorios específicos de la tarea.

Diferentes áreas del córtex prefrontal se han relacionado con procesos inhibitorios implicados en el paradigma de alternancia. En un clarificador estudio neuropsicológico realizado por Rogers y cols. (1998) se evaluó, mediante un paradigma de alternancia, el *switch cost* conductual en pacientes con lesiones unilaterales en el córtex prefrontal (izquierdo o derecho). En una tarea se presentaban estímulos formados por una palabra (“izquierda” o “derecha”) dentro de una forma (flecha hacia la izquierda, flecha hacia la derecha o un rectángulo) y en la otra, una flecha junto a una cadena de letras (“izquierda”, “derecha” o “xxx”). En ambas tareas se daban tres condiciones: congruencia, incongruencia o neutralidad. Además, se introdujeron cambios predecibles y variaciones en el intervalo E-R (corto/largo) que implicaban distintos grados de preparación para la reconfiguración de las asociaciones E-R. Los resultados conductuales mostraron que los pacientes con lesiones en el córtex prefrontal izquierdo tenían mayor dificultad en aplicar la configuración E-R apropiada [indicado por mayores *switch cost* en ambos tipos de intervalos (cortos y largos)] debido a un reducido control endógeno y una exagerada influencia de pistas exógenas. Por el contrario, los pacientes con lesiones en el córtex prefrontal derecho presentaban mayores dificultades en suprimir las

respuestas inapropiadas [mostraron mayores *switch cost* en eficacia en los ensayos incongruentes (vs. los congruentes)] por déficits en la inhibición reactiva. En consonancia con estos resultados, Brass y cols. (2003) evidenciaron que el córtex prefrontal lateral mediaba el cambio de respuesta en un paradigma de alternancia, por lo que asignaron a esta área funciones de atribución de significado a la respuesta en función de los objetivos. Además, otros estudios también han relacionado el córtex prefrontal dorsolateral con funciones de mantenimiento y establecimiento de las asociaciones estímulo-respuesta (MacDonald y cols., 2000; Garavan y cols., 2002).

En un estudio realizado por Fox y cols. (2005) se relacionó el giro frontal inferior izquierdo con mecanismos de selección entre respuestas competitivas. En este paradigma de alternancia se les presentaban a los participantes dos conjuntos de letras a recordar, cada uno formado por tres letras y localizados en partes opuestas de la pantalla. Seguidamente, uno de estos conjuntos pasaba a ser la pista para las respuestas [en tinta verde indicaba que ese era el conjunto estimular objetivo (condición Recordar) y en rojo que era el otro (condición Olvidar)]. En las siguientes presentaciones únicamente aparecía la pista (alternando rojo y verde) y a continuación una letra. Los participantes respondían “sí” o “no” en función de la presencia de la letra en el conjunto objetivo. Los resultados mostraron mayores activaciones en el giro frontal inferior izquierdo para la condición Olvidar (vs. Recordar), sugiriendo que esta área podría estar implicada en procesos generales de selección entre respuestas competitivas (Fox y cols., 2005). Otros estudios basados en éste paradigma también han hallado activaciones en el córtex frontal inferior y en el

prefrontal dorsolateral izquierdo (Dreher y cols., 2002; Dove y cols., 2000; Shon y cols., 2000).

Por otra parte, el giro frontal inferior derecho se ha relacionado consistentemente con la inhibición de respuestas (Aron y cols., 2004; Robbins, 2007). Por ejemplo, en un estudio de alternancia entre bloques, Konishi y cols. (2001) hallaron activaciones en el giro frontal inferior derecho durante la transición entre bloques (en ausencia de respuestas por parte del sujeto). En otra tarea de cambio de set, esta estructura se vinculó con la inhibición de respuestas inapropiadas (Gehring y Knight, 2000). También se vieron activaciones en esta área en ciertas formas de alternancia entre tareas (Aron y cols., 2004; Pessoa y cols., 2009; Robbins, 2007) y en otras investigaciones fMRI se la ha relacionado con procesos de inhibición de respuesta (Bunge y cols., 2002; Garavan y cols., 1999; Rubia y cols., 2003; Gehring y Knight, 2000). Investigaciones de MRI estructural (Sowell, 2003; Castellanos, 1996) y EEG (Overtoom y cols., 2002) demostraron que alteraciones en el córtex frontal inferior derecho estaban en la base de déficits en la inhibición de respuestas en niños y adultos diagnosticados con el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH). Los estudios neuropsicológicos, en la misma línea, han evidenciado peores inhibiciones de respuesta tras lesiones en el córtex frontal inferior derecho, tanto en pacientes como en macacos (Mishkin, 1964; Iversen y Mishkin, 1970).

En una revisión realizada por Robbins (2007) acerca de las bases neurales de las funciones implicadas en paradigmas de alternancia, WCST e inhibición de respuesta, se planteó que las bases neurales de los procesos de inhibición de respuesta se hallaban en el giro frontal inferior derecho. De hecho,



algunos de los primeros estudios con primates ya mostraron que lesiones en el área equivalente al giro frontal inferior derecho de los humanos (la convexidad inferior) producían peores actuaciones en tareas de *go-no go* (Iversen y Mishkin, 1970). Más recientemente, estudios con neuroimagen han dado apoyo al papel de esta estructura en procesos de inhibición de respuesta (Konishi y cols., 1998; Garavan y cols., 1999; Menon y cols., 2001; Rubia y cols., 2008). En otras investigaciones se han hallado correlaciones significativas entre el SSRT y el volumen de lesiones en el giro frontal derecho, así como entre el SSRT y el *switch cost* o *restart cost* (Robbins, 2007). Así, los resultados parecen diferenciar entre procesos de reconfiguración de las asociaciones ligados al córtex prefrontal izquierdo y procesos de inhibición de respuestas inapropiadas, más relacionados con el córtex prefrontal derecho (Aron y cols., 2004).

El importante papel de los ganglios basales y los circuitos frontoestriatales en el procesamiento inhibitorio también ha sido repetidamente evidenciado tanto en la literatura neuropsicológica como en la experimental. Estudios neuropsicológicos realizados por Rieger y sus colaboradores (2003) evidenciaron déficits importantes en la capacidad de inhibir acciones en curso en pacientes con lesiones en dichas estructuras subcorticales. Por su parte, Yehene y su equipo (2008), mostraron que pacientes con lesiones de este tipo cometían una elevada tasa de errores en una tarea basada en el paradigma de alternancia, cuando se les comparaba con el grupo control. A partir de los resultados, se atribuyó a los ganglios basales, un papel central en la selección y/o inhibición de información irrelevante. Asimismo, se han encontrado déficits importantes en la supresión de respuestas en determinados trastornos que

implican la degeneración de los ganglios basales, como la enfermedad de Parkinson (Dujardin y cols., 1999; Pollux y Robertson, 2002; Cools y cols., 2004), la enfermedad de Huntington (Lawrence y cols., 1998; Aron y cols., 2003) y determinados trastornos psiquiátricos como la esquizofrenia (Rubia y cols., 2011), el trastorno obsesivo-compulsivo (TOC) (Maltby y cols., 2005) o el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) (Nigg, 2003). De nuevo, los déficits han sido atribuidos a alteraciones en circuitos fronto-estriatales. Investigaciones de neuroimagen han demostrado la participación del núcleo subtalámico (Aron y Poldrack, 2006) y del caudado (Chevrier y cols., 2007) en tareas de la supresión de respuestas *go* ya iniciadas (en tareas de señal de *stop*). En otro estudio con neuroimagen funcional, Monchi y su equipo (2006) encontraron un incremento en la actividad en los ganglios basales en una tarea de planificación y cambio de set, sin embargo se hallaron diferencias funcionales entre algunas de sus estructuras. Más concretamente, se vio activación en el caudado y el putamen únicamente cuando el cambio de *set* requería cierta planificación cognitiva, mientras que la activación se centraba en el núcleo subtalámico en aquellas situaciones en las que el cambio no requería planificación. Los resultados sugirieron la implicación del caudado en tareas de manipulación cognitiva pero no en el mantenimiento o recuperación de la información en la memoria de trabajo. De modo que el papel del caudado se centraría en la planificación de una acción nueva y no en el cambio *per se*, mientras que el putamen intervendría en la ejecución de una acción basada en una estrategia nueva autodeterminada (Monchi y cols., 2006).

En un reciente estudio, Aarts y cols. (2010) evaluaron la respuesta *BOLD-fMRI* en una tarea de alternancia basada en pistas. Esta tarea (análoga

a la de Aron y cols., 2004) consistía en la presentación de estímulos compuestos (una flecha y una palabra siempre incongruentes entre ellas) y de una pista que indicaba a qué estímulo debía responderse. Además de los análisis conductuales y *fMRI*, también se tuvieron en cuenta aspectos neuroquímicos, con la finalidad de estudiar la implicación de la dopamina estriatal en procesos de flexibilidad cognitiva. De acuerdo con las hipótesis planteadas por los investigadores, los resultados evidenciaron que el estriado (mediante conexiones dopaminérgicas) desempeñaba un papel crítico en procesos de control y flexibilidad cognitiva de alto nivel, a la vez que se veía directamente afectado por el estado motivacional del individuo. Según los autores, variaciones genéticas en las proteínas transportadoras de la dopamina (muy abundantes en el estriado) explicarían la relación entre las tareas de alternancia y el estado motivacional del individuo. Más concretamente, los resultados apuntaban hacia dos procesos motivacionales dependientes de la dopamina y ligados a distintas partes del estriado que influían en la ejecución de la tarea de alternancia. Según los autores, uno de estos procesos dependía del estriado medial y se relacionaba con la anticipación de la recompensa; mientras que el otro, dependiente del estriado lateral, estaba implicado en procesos consumatorios de la recompensa. Los resultados conductuales apoyaron dicha diferenciación, viéndose diferencias en los *switch cost* en función de procesos motivacionales (menores costes cuando se anticipaba la recompensa y mayores cuando acababan de recibirla). De hecho, en estudios previos con ratones se vio que los procesos preparatorios y consumatorios de la recompensa estaban ligados a distintas regiones del estriado (Everitt y Robbins, 1992; Voorn y cols., 2004). Según Aarts y cols. (2010), el estriado

serviría de puente entre el procesamiento cognitivo y el motivacional, facilitando la actualización de las representaciones de la tarea (en el córtex prefrontal) en función de las metas.

A modo de resumen, los estudios realizados con tareas de alternancia parecen atribuir un papel clave al córtex prefrontal lateral y áreas relacionadas en las funciones implicadas en este paradigma. Más concretamente, el papel del giro frontal inferior derecho podría estar implicado en la inhibición de respuestas preponderantes, basadas en procesos exógenos; mientras que el giro frontal inferior izquierdo estaría más relacionado con procesos endógenos de reconfiguración de las asociaciones E-R. A su vez, el córtex prefrontal mantendría relaciones con otras estructuras, destacando el circuito fronto-estriatal. A nivel subcortical, el núcleo subtalámico podría intervenir en el cambio *per se*, el caudado en la planificación de una acción nueva y el putamen en la ejecución. El estriado, en conexión con el córtex prefrontal, podría relacionar aspectos cognitivos y motivacionales, aportando una mayor flexibilidad y adaptación a la conducta. Aunque habría diferencias funcionales (procesos anticipatorios y consumatorios) entre distintas partes del estriado (medial y lateral, respectivamente).

## 1.2 CONTROL COGNITIVO EN EL BILINGÜISMO

El término bilingüe se utiliza para designar a aquellos hablantes que, por crecer en ambientes en los que se utilizan regularmente dos lenguas, desarrollan habilidades propias de los nativos pero para ambas lenguas (bilingües tempranos y proficientes). Por el contrario, los monolingües son hablantes que aunque hayan adquirido conocimientos sobre varias lenguas mediante formación académica utilizan, únicamente, una de manera habitual en su día a día. Una de las características más relevantes del cerebro de un bilingüe es su capacidad de controlar qué lenguaje utilizar y en qué contexto, tanto para la producción como para la comprensión del habla (Abutalebi y cols., 2008). Sin embargo, la relación entre el bilingüismo y el control atencional no se ha abordado de forma rigurosa y experimental hasta estos últimos años. Uno de los motivos más probables para este auge es la mayor especificidad y detalle de las teorías actuales, tanto sobre la producción del habla como acerca del control ejecutivo.

### 1.2.1 Mitología y bilingüismo

Los primeros estudios acerca de los efectos colaterales del bilingüismo datan de entre 1920 y 1960. Estos estudios tempranos difundieron connotaciones muy negativas asociadas al bilingüismo, tales como problemas mentales u otras condiciones incapacitantes. De manera que, durante años, la condición de bilingüe fue asociada con personalidades conflictivas, llegándose a extrapolar la realización de frecuentes cambios entre lenguas a la de cambios políticos y morales (Hakuta, 1986). A este respecto, debe tenerse en cuenta que la controversia en torno al bilingüismo fue magnificada por la urgencia

derivada de importantes cambios demográficos; como es el caso de determinados estados de Estados Unidos (California, Nuevo México, Tejas, Nueva York, etc.) donde se produjo un importante aumento de la población en edad escolar que no utilizaba el inglés como lengua primaria en casa, llegando a existir un 50% de alumnos con esta característica (Hakuta y Garcia, 1989).

Uno de los autores más representativos de la época fue Adler (1977), quien describió a los bilingües adultos de la siguiente manera: “A menudo tienen mentes divididas... todas las particularidades que evidencian a nivel lingüístico, histórico, geográfico y cultural, son encarnadas en el bilingüe de manera doble: ni está aquí, ni allá: es un hombre marginal” (página 38). Además, también describió a los niños bilingües de la siguiente manera: “sus normas están divididas, presentan una menor articulación de lo que se podría esperar de alguien que es capaz de expresarse en dos lenguas distintas y sus emociones son más instintivas; en resumen, el bilingüismo puede llevar a desarrollar una personalidad dividida y, lo que es peor, a la esquizofrenia” (página 40).

Asimismo, otro de los mitos que interfirió ampliamente en la investigación temprana con bilingüismo fue la creencia de que, en el cerebro de los niños, existía un espacio concreto y reservado para el procesamiento de cada una de las lenguas. Desde este punto de vista (que en 1981 Cummins llamó “The Separated Underlying Proficiency”) el lenguaje se localizaba en una especie de almacén limitado dentro de la cabeza, asignando un único compartimento a los monolingües (con vocabulario, ideas y conceptos) y dos compartimentos separados a los bilingües (uno por lengua, cada uno con la mitad de la capacidad del compartimento único de los monolingües). De esta

manera, en la cabeza del niño bilingüe no habría el suficiente espacio para llenar ambos compartimentos, por lo que el espacio disponible para la primera lengua decrecería a medida que se mejorase en la segunda.

Cabe decir que estas perspectivas fueron formuladas hace mucho tiempo y de una manera totalmente arbitraria. Desde entonces, varias décadas de investigación experimental han arrojado algo de luz sobre la verdadera naturaleza de los bilingües y aunque parte de esta verdad todavía permanece escondida, se ha avanzado considerablemente en el conocimiento sobre el procesamiento del lenguaje en el bilingüe y los efectos colaterales del bilingüismo.

### 1.2.2 Estudios conductuales de control lingüístico

El estudio de las diferencias en control lingüístico entre bilingües y monolingües ha evidenciado desventajas, a nivel conductual, en los bilingües. Por ejemplo, se ha visto que los bilingües sufren más experiencias de *punta de la lengua* y una mayor interferencia en tareas de decisión léxica (Bialystok y cols., 2008). También, que los bilingües son más lentos y cometen un mayor número de errores en tareas de denominación de imágenes individuales (Gollan y cols., 2005) incluso cuando nombran en su lengua dominante (Ivanova y Costa, 2008). Esta desventaja se ha relacionado con el tiempo extra requerido por los bilingües para llevar a cabo procesos de control del lenguaje. Evidencias más dramáticas de esta necesidad de control provienen de pacientes neuropsicológicos bilingües que, después de sufrir un daño cerebral, son incapaces de controlar la lengua que utilizan (ej. Abutalebi y cols., 2000;

Mariën y cols., 2005), lo que genera una mezcla y alternancia continua entre estas.

El estudio del efecto de la proficiencia en el bilingüismo mediante tareas de alternancia entre lenguas ha evidenciado costes simétricos en los cambios entre lenguas de bilingües proficientes, pero asimétricos para los bilingües poco proficientes (Costa y cols., 1999; Finkbeiner y cols., 2006). Según se cree, los costes asimétricos se deben a que cuando los bilingües poco proficientes utilizan la lengua dominante (L1) apenas activan la segunda lengua (L2) por lo que tampoco necesitan inhibirla cuando activan la L1. Sin embargo, al cambiar de la L2 a la L1, como la L1 está muy inhibida para evitar que interfiera con la lengua menos dominante, se necesita cierto esfuerzo cognitivo para revertir dicha inhibición, que se manifestaría en mayores TR (Costa y Santesteban, 2004; Costa y cols., 2006; Meuter y Allport, 1999).

Teniendo en cuenta la literatura previa se han planteado, principalmente, dos hipótesis teóricas acerca del procesamiento del lenguaje en el cerebro del bilingüe: la hipótesis del control de la interferencia y la de la frecuencia reducida. Por una parte, la hipótesis del Control de la Interferencia propone que cada vez que el bilingüe activa un determinado concepto, lo hace en ambas lenguas, seleccionando la deseada mientras minimiza la competencia de la no deseada, inhibiendo así la palabra de la otra lengua (Green, 1998). Según este planteamiento, el aprendizaje y uso de otras lenguas aumentaría la interferencia y generaría demandas adicionales en los mecanismos de control de la interferencia (Green, 1998; Rodríguez-Fornells y cols., 2002, 2005; Abutalebi y Green, 2007). Por otra parte, la hipótesis de la Frecuencia Reducida sostiene que los monolingües son más eficaces lingüísticamente que



los bilingües porque utilizan siempre la misma palabra para referirse a un concepto, mientras que en los bilingües la frecuencia de uso de cada palabra está dividida en dos o más lenguas. Esta menor frecuencia de uso dificultaría el uso del lenguaje en los bilingües, que serían lingüísticamente menos eficientes que los monolingües, tal y como se ha visto en determinados estudios conductuales (Gollan y cols., 2002, 2005, 2008; Gollan y Acenas, 2004; Ivanova y Costa, 2008; Pyers y cols., 2009). Sin embargo, estudios psicolingüísticos y de neuroimagen afirman que el bilingüe mantiene activas ambas lenguas incluso cuando utiliza, únicamente, una de ellas (Van Heuven y Dijkstra, 2010; Wu y Thierry, 2010).

### 1.2.3 Estudios conductuales de control atencional

Desde el punto de vista histórico, el estudio que Peal y Lambert llevaron a cabo en 1962, representa un punto de inflexión de las connotaciones negativas a las positivas asociadas con el bilingüismo. En este estudio, los niños bilingües francés-inglés (en Quebec) mostraron ventajas conductuales cuando realizaban tareas cognitivas, en comparación con los monolingües. Las ventajas observadas les llevaron a concluir que los bilingües tenían “una mayor flexibilidad mental, una superioridad en la formación de conceptos y un conjunto de habilidades mentales más diversificadas”.

Desde entonces, diversas declaraciones exaltando las ventajas cognitivas asociadas al bilingüismo han reemplazado a las iniciales y negativas connotaciones asociadas a éste fenómeno. Apoyándose en resultados de un gran número de estudios que han evidenciado beneficios derivados del bilingüismo en el funcionamiento del sistema atencional (Bialystok, 1999;

Bialystok y Martin, 2004; Carlson y Meltzoff, 2008; Costa y cols., 2008; Martin-Rhee y Bialystok, 2008).

Green (1998) propuso un modelo de control cognitivo en el que se especificaban los procesos atencionales implicados en la producción del habla en bilingües. Siguiendo esta propuesta teórica, los hablantes bilingües utilizarían mecanismos de control inhibitorio durante la producción del habla, que se encargarían de inhibir las representaciones lingüísticas de la lengua que no está en uso. Así, la producción del lenguaje en un bilingüe requeriría la participación constante del sistema de control ejecutivo para resolver el conflicto entre lenguas. La participación de estos mecanismos de control generaría ciertos costes en la producción del habla en bilingües (Ivanova y Costa, 2008). Por otro lado, el uso continuo de procesos inhibitorios durante la producción del habla, provocaría un desarrollo más eficiente de los procesos del sistema de control ejecutivo relacionados con el control inhibitorio (Green, 1998; Bialystok y cols., 2004; Abutalebi y Green, 2007; Kroll y cols., 2008). Por decirlo de alguna manera, es como si el hablante bilingüe estuviera sobreentrenado en el uso de control atencional (Abutalebi y Green, 2007).

Un paradigma ampliamente utilizado en el estudio de las capacidades atencionales ha sido el *Attentional Network Task* (ANT) desarrollado por Fan y cols. (2002). En esta tarea los participantes veían 5 flechas y debían indicar si la central apuntaba hacia la derecha o la izquierda. Cuando las restantes 4 flechas apuntaban hacia la misma dirección se trataba de un ensayo congruente e incongruente, si apuntaba hacia la contraria. Mediante este tipo de tareas se evidenció el efecto del conflicto, con respuestas más lentas en los ensayos incongruentes que en los congruentes. Al comparar la actuación de

los hablantes bilingües con la de los monolingües se vieron menores efectos del conflicto (Bialystok y cols., 2004; Bialystok y cols., 2008; Costa y cols., 2008) y una mayor velocidad de respuesta (generalizada) en los bilingües (Bialystok, 2006; Costa y cols., 2008, 2009; Martin-Rhee y Bialystok, 2008). El hecho de que los bilingües respondiesen con una mayor velocidad incluso en los ensayos en los que no había conflicto (Bialystok, 2006; Costa y cols., 2008, 2009), podría deberse a que este grupo de hablantes presentase un sistema de procesamiento del conflicto más eficiente que los monolingües (Costa y cols., 2009).

Por otra parte, estudios realizados con la tarea *Simon* (se presentan estímulos a la derecha e izquierda y se responde apretando manualmente dos teclas, además los estímulos tienen un atributo relevante, como la forma o color, y uno irrelevante, como la localización espacial) también han evidenciado ventajas en los procesos inhibitorios en niños bilingües, en comparación con los monolingües. Sin embargo, la ventaja bilingüe estaba tanto en los ensayos incongruentes (que requerían la inhibición de información no deseada) como en los congruentes (que no implicaban procesos inhibitorios). Como consecuencia, Bialystok y cols. (2005a) propusieron, por primera vez, que la ventaja bilingüe podría implicar procesos de control cognitivo como la monitorización, más allá de la inhibición. Cabe decir que el mismo patrón de ventajas conductuales también fue hallado en bilingües de mediana edad (de 30 a 60 años) y en adultos mayores (de 60 a 80 años). Sin embargo, cuando se administró la tarea *Simon* a adultos jóvenes (de 20 a 30 años) no se hallaron diferencias entre ambos grupos de hablantes. Esta observación llevó a Bialystok a proponer que los efectos del bilingüismo en el control ejecutivo eran indetectables en adultos

jóvenes debido a que ambos grupos se encuentran en el pico de su eficiencia cognitiva. Es decir, que cuando las habilidades del sistema de control ejecutivo están trabajando a su nivel máximo de capacidad no hay lugar para que el bilingüismo ejerza un efecto significativo. En otros experimentos realizados por Bialystok y cols. (2004) se halló un menor efecto de la tarea Simon en los bilingües de mediana y alta edad.

En otra serie de investigaciones con adultos y gente de edad avanzada, se halló un menor efecto Simon en los bilingües (vs. monolingües) así como menores tiempos de reacción para los bilingües en las condiciones con más demandas de control ejecutivo (Bialystok y cols., 2004). El hecho de encontrar mayores diferencias entre bilingües y monolingües a medida que se incrementa la edad de los participantes, fue interpretado como una evidencia de que el bilingüismo actúa como una especie de factor de protección contra el deterioro de ciertos procesos de control ejecutivo asociados con la edad.

Por otra parte, distintas investigaciones demostraron que el control ejecutivo se desarrolla antes en niños bilingües que en monolingües (Bialystok, 2001; Carlson y Meltzoff, 2008; Kovacs, 2009), que era más eficiente en adultos jóvenes bilingües (Bialystok, 2006; Colzato y cols., 2008; Costa y cols., 2008) y que dichas ventajas se mantenían en la edad adulta (Bialystok y cols., 2004, 2008; Kavé y cols., 2008). En relación a aspectos madurativos, algunas investigaciones vincularon el deterioro lingüístico propio de la vejez al declive de las habilidades atencionales. Así, pérdidas en el procesamiento atencional propias de la edad influirían en una mayor alternancia entre lenguas (Juncos-Rabadán e Iglesias, 1994).

En una serie de experimentos realizados por Bialystok y cols. (2004), se les pedía a niños bilingües y monolingües (de unos 5 años de edad) que clasificasen cartas en función de ciertas características (unas veces perceptuales y otras semánticas). Ambos factores subdivididos en dos dimensiones: el perceptual en forma (circulo/cuadrado) y el color (rojo/azul) y el semántico en funcionalidad (para jugar/para vestir) y localización habitual (dentro de casa/fuera de casa). Los resultados mostraron que la ejecución de los bilingües superaba a la de los monolingües únicamente en los ensayos de cambio perceptual, siendo igual su ejecución en los cambios semánticos. Dichos resultados se interpretaron como una evidencia de que ambos grupos eran igualmente eficientes en la reconstrucción de las representaciones mentales de los objetos (propia de las características semánticas). Sin embargo, los bilingües tenían más desarrollados los procesos inhibitorios encargados de prevenir la interferencia del criterio previo (Bialystok, 2004).

En otro estudio, Colzato y cols. (2008) compararon la ejecución de bilingües y monolingües en tres tipos de tareas cognitivas que implicaban procesos inhibitorios: la señal de *stop*, inhibición de retorno y ceguera atencional. En la tarea de señal de *stop* se presenta un estímulo al cual se responde (habitualmente, de manera manual), pero cuando al estímulo le sigue una señal de *stop* los participantes deben inhibir dicha respuesta. La inhibición del retorno se evidencia en mayores TR para responder a lugares hacia los que se ha orientado la atención de manera involuntaria previamente. Por último, la ceguera atencional se aprecia en el breve intervalo de tiempo, siguiente a la respuesta a un estímulo visual atendido, en el que un estímulo visual posterior no puede ser visto o informado de forma exacta. Por una parte, los resultados

mostraron que no había diferencias conductuales entre bilingües y monolingües en los procesos de inhibición activa que se ven implicados en la tarea de la señal de *stop*. Por otra parte, los bilingües mostraron más dificultades que los monolingües en el procesamiento de un estímulo posterior mientras aún estaban procesando el previo. De acuerdo con los autores, los resultados indicarían que los bilingües invierten más recursos en el procesamiento de un estímulo objetivo, ejerciendo una mayor inhibición sobre los competidores. De este modo, el constante control de dos lenguas en los bilingües llevaría a mejoras generales en la selección de información relevante; sin embargo, más que reducir la activación de los estímulos irrelevantes (con procesos de inhibición activa), los bilingües ejercerían una mayor activación de las representaciones relevantes (mediante procesos de inhibición reactiva) que facilitarían el mantenimiento de metas de acción y el manejo de información dirigida a las metas, generando procesos más pronunciados de inhibición reactiva a la información relevante.

En esta línea de diferenciar los tipos de procesos inhibitorios, debe de tenerse en cuenta la clasificación realizada por Bunge y cols. (2002), que diferenciaba entre supresión de la interferencia (inhibición de una pista que interfiere) e inhibición de la respuesta (inhibición de una respuesta habitual). En la supresión de la interferencia el conflicto se resolvería atendiendo selectivamente a los estímulos relevantes e ignorando los competitivos; mientras que en la inhibición de la respuesta, se evitaría dar una respuesta automática. En tareas que implicaban la supresión de la interferencia se vieron ventajas conductuales en niños bilingües (Bialystok y Senman, 2004; Bialystok y Shapero, 2005), pero no en las que implicaban inhibición de la respuesta

(Bialystok y cols., 2006; Carlson y Meltzoff, 2008; Martin-Rhee y Bialystok, 2008). Los resultados apoyarían la propuesta teórica de Green (1998), ya que la ventaja bilingüe en la supresión de la interferencia derivaría de una mayor eficiencia en procesos inhibitorios específicamente implicados en el control de ambas lenguas, inhibiendo la interferencia de la lengua no deseada.

A este respecto, interesa comentar la revisión que llevaron a cabo Hilchey y Klein (2011) para avanzar en el conocimiento de la posible ventaja bilingüe en tareas de interferencia no lingüística. En ésta, se afirma que la ventaja bilingüe en la resolución del conflicto es, en el mejor de los casos, esporádica y, en ocasiones, ausente. De hecho, la ventaja bilingüe en la supresión de la interferencia se daría únicamente en bilingües jóvenes y de manera muy breve, desapareciendo rápidamente con la práctica; características que estarían más relacionadas con procesos cognitivos de reconfiguración, que con una ventaja continua en el funcionamiento sistema de control inhibitorio. Sin embargo, existiría una clara ventaja bilingüe en forma de TR globales en tareas de interferencia no lingüística y con cierto grado de dificultad que, además, se manifestaría desde la infancia hasta la vejez. La hipótesis que apoyan estos resultados localiza el efecto del bilingüismo en el sistema de control ejecutivo central, que se encargaría de regular el procesamiento de una amplia variedad de demandas cognitivas. Los componentes de este sistema estarían estrechamente relacionados con otros circuitos cognitivos que sí se verían afectados por la experiencia en el lenguaje, y que contribuirían a la regulación del control cognitivo, delegando el procesamiento a otros circuitos o áreas cerebrales. Este planteamiento explicaría la ventaja bilingüe evidenciada en los procesos de monitoreo de las

representaciones que compiten por la selección en tareas de control cognitivo no lingüístico. Otro estudio, siguiendo la misma línea, afirma que no existen diferencias entre bilingües y monolingües en inhibición, sino en el proceso de *disengagement* de la información, concepto similar al de supresión de la interferencia (Mishra y cols., 2012).

En resumen, numerosos estudios conductuales han evidenciado ventajas en los hablantes bilingües en tareas de control atencional, lo que apuntaría hacia un desarrollo más precoz de ciertas funciones ejecutivas, además de un procesamiento del conflicto más eficiente en los bilingües. Dichas ventajas se relacionarían con un determinado proceso de control inhibitorio: la supresión de la interferencia, debido al continuo control de ambas lenguas, que equivaldría a un sobre-entrenamiento en las funciones cognitivas implicadas. Sin embargo, los bilingües sufrirían mayores costes conductuales que los monolingües en tareas de dominio lingüístico, debido al esfuerzo requerido para controlar sus dos lenguas. Dicha asimetría en los costes es uno de los resultados que más apoyo brindan al modelo propuesto por Green (1986).

#### 1.2.4 Estudios cerebrales de control lingüístico

Los primeros estudios sobre las bases neurales del bilingüismo se centraban, principalmente, en el estudio de la representación cerebral de ambas lenguas; con el objetivo de clarificar si las dos lenguas del bilingüe compartían bases cerebrales o por el contrario, tenían sustratos cerebrales distintos (Kim y cols., 1997). Una vez establecido el solapamiento entre la activación cerebral de ambas lenguas, las investigaciones pasaron a centrarse



en el control del lenguaje a nivel cerebral; es decir, en cómo dicho solapamiento entre áreas cerebrales participaba en la selección entre lenguas, la alternancia y la inhibición selectiva de la lengua no deseada.

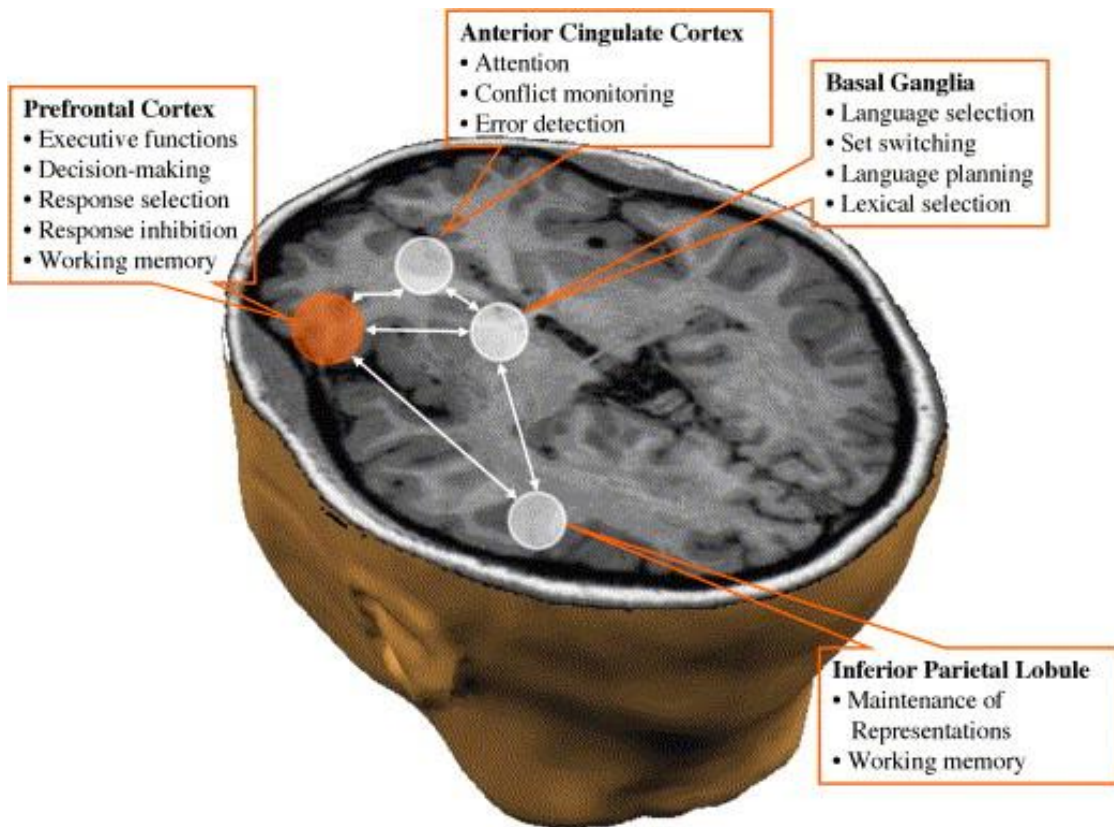
La investigación neuropsicológica y los estudios con técnicas de neuroimagen proponen que la red cerebral de control del lenguaje estaría formada por el núcleo caudado izquierdo, el córtex cingulado anterior, el prefrontal lateral y el parietal inferior izquierdo (Abutalebi y Green, 2007). Relevantemente, estas áreas no se especializarían en dicha función, sino que adquirirían un rol específico en el control del lenguaje como parte de su función general.

La lesión cerebral que más frecuentemente se ha relacionado con la patológica alternancia entre lenguas en bilingües es la que afecta a los ganglios basales del hemisferio izquierdo (Abutalebi y cols., 2000; Aglioti y Fabbro, 1993). Como se ha comentado, el papel del caudado se centraría en la planificación de una acción nueva; el del putamen, en la ejecución de una acción basada en una estrategia (Monchi y cols., 2006) y el del estriado, en procesos de control y flexibilidad cognitiva, viéndose directamente afectados por el estado motivacional del individuo (Aarts y cols., 2010). En el caso de los bilingües, estas áreas también participarían en la planificación, selección y alternancia entre lenguas, posiblemente implicados en la selección de la alternativa léxica más apropiada durante la producción del habla (Wallesch, 1985), contribuyendo a suprimir la interferencia de la lengua no deseada (Abutalebi y Green, 2007).

En segundo lugar, otra área implicada en el control del lenguaje sería el córtex cingulado anterior, estrechamente relacionada con el monitoreo de conflictos (Carter y cols., 1999; Botvinick y cols., 2004) y la toma de decisiones (Cole y cols., 2010). En el caso de los bilingües, el córtex cingulado anterior también podría encargarse del control de la interferencia entre L1 y L2, detectando los conflictos entre respuestas incompatibles (Ye y Zhou, 2009), así como de la alternancia entre lenguas (Abutalebi y cols., 2008, 2012).

En tercer lugar, otra de las áreas implicadas en el control del lenguaje es el córtex prefrontal lateral izquierdo, incluyendo áreas dorso y ventrolaterales. Estas áreas cerebrales llevarían a cabo funciones ejecutivas generales de la conducta consecuente a un estímulo, ejerciendo importantes funciones de control endógeno en tareas de alternancia (Robbins, 2007). En los bilingües, el córtex prefrontal lateral participaría activamente en la red de control del lenguaje, ejerciendo un importante papel en la selección e inhibición del lenguaje y en la memoria de trabajo (Abutalebi y Green, 2007).

Finalmente, la otra área propuesta para esta red sería el parietal inferior izquierdo, que se encargaría del mantenimiento de las representaciones del lenguaje en la memoria de trabajo (Abutalebi y Green, 2007).



#### 1.2.5 Estudios cerebrales de control cognitivo

Desde el punto de vista cerebral, los efectos colaterales del bilingüismo sobre el sistema de control ejecutivo apenas han sido estudiados. Sin embargo, los pocos estudios al respecto han evidenciado diferencias cerebrales entre ambos grupos cuando realizaban tareas de control cognitivo no lingüístico.

En un estudio realizado por Bialystok y cols. (2005), se estudiaron las diferencias entre bilingües (considerando dos grupos de bilingües, unos del cantonés-inglés y otros del francés-inglés) y monolingües (inglés) cuando

realizaban una tarea *Simon* con MEG (Magneto-encefalografía). Los resultados conductuales evidenciaron que los bilingües cantonés-inglés eran más rápidos respondiendo. Además, el análisis de las correlaciones entre las activaciones cerebrales y los TR, asoció las respuestas más rápidas en los bilingües con activaciones en áreas izquierdas del córtex temporal (superior y medial), frontal (superior e inferior) y del cíngulo. Sin embargo, en los monolingües, los mejores tiempos se asociaban con activaciones en áreas frontales mediales.

Posteriormente, en un estudio de Abutalebi y cols. (2012) se evidenció que los bilingües utilizaban el córtex cíngulo anterior más eficientemente que los monolingües cuando resolvían conflictos cognitivos no lingüísticos. De este modo, los bilingües mostraron una menor activación del córtex cíngulo anterior asociada a ventajas conductuales. Además, tales ventajas y menor activación correlacionaban positivamente con un mayor volumen de sustancia gris en dicha área.

De este modo, los resultados de estudios previos evidenciaron diferencias entre bilingües y monolingües en el funcionamiento de redes cerebrales asociadas a las funciones de control ejecutivo. Por lo que efectivamente, se cree que tener experiencia con dos lenguas y desde temprana edad podría ayudar al establecimiento de la red de control cognitivo, dirigiendo la implicación de áreas de control del lenguaje en tareas de control cognitivo no lingüístico.

## **CAPÍTULO 2. SECCIÓN EXPERIMENTAL**

### **2.1 SÍNTESIS TEÓRICA**

En los últimos años se ha producido un vertiginoso aumento de la población bilingüe que, inevitablemente, ha propiciado la aparición de múltiples preguntas acerca de los efectos colaterales del bilingüismo. Dichos efectos se han estudiado, tanto en los procesos que implican procesamiento del lenguaje como en aquellos no directamente relacionados con el mismo. Teniendo en cuenta resultados de investigaciones previas, existirían diferencias en el procesamiento del lenguaje que bilingües y monolingües llevan a cabo. Dichas diferencias, halladas tanto a nivel conductual como cerebral, parecen indicar que el bilingüe ejerce un constante control cognitivo de sus dos lenguas cuando realiza procesos de lenguaje, para evitar la interferencia de la lengua no deseada.

Así, los bilingües serían ligeramente menos eficaces que los monolingües en la realización de algunas tareas lingüísticas, debido a la necesidad de emplear ciertos recursos cognitivos para resolver los conflictos entre ambas lenguas. Sin embargo, estudios con tareas de control cognitivo no lingüístico han evidenciado ciertas ventajas conductuales (en TR y número de aciertos) en los bilingües cuando se los compara con los monolingües. Por otra parte, estudios cerebrales sobre el control del lenguaje indicarían que los bilingües activan una extensa red cerebral (integrada por áreas corticales y subcorticales) que también intervendría en el control lingüístico del monolingüe pero que, ajustándose a las mayores demandas del bilingüe, generaría ciertas

diferencias en el procesamiento del lenguaje de ambos grupos. Dicho esfuerzo se ha manifestado en forma de distintas activaciones: en el córtex prefrontal, que se reducirían a medida que aumentase la habilidad y se automatizasen los procesos implicados; en el cíngulo anterior, asociado con la detección del conflicto entre lenguas; en el caudado, por la inhibición de la lengua no deseada; en el córtex parietal, vinculadas al mantenimiento de las representaciones de la memoria de trabajo; en áreas temporales, relacionadas con el feedback auditivo-motor de la respuesta articulatoria; etc. Esta red no tendría una función específica de control lingüístico, sino que ejercería esta función junto con otras funciones de control cognitivo.

Sin embargo, apenas se han realizado estudios cerebrales en tareas de control cognitivo comparando ambos grupos. Y éste es precisamente el aspecto abordado en esta tesis: la detección de diferencias cerebrales entre bilingües y monolingües cuando realizan tareas de control cognitivo no lingüísticas. Más concretamente, se pretende avanzar en el conocimiento de los efectos del bilingüismo tanto en los procesos inhibitorios, mediante una tarea de *señal de stop* manual, como en otros de alternancia, mediante dos paradigmas de alternancia entre tareas no lingüísticas [teniendo en cuenta el modelo de control dual de Braver (2012), detallado en el punto 1.1.2.4 de esta tesis, en una predominarían mecanismos de control cognitivo reactivos (Garbin y cols., 2010) y en la otra, mecanismos de control proactivos (Rodríguez-Pujadas y cols., pendiente de publicación)]. La hipótesis global de trabajo sería comprobar si los bilingües tempranos y proficientes, debido a la continua necesidad de manejar las dos lenguas que utilizan, desarrollan una forma diferente de control cognitivo en tareas no lingüísticas. Esta forma diferente se

manifestaría en un mayor uso de áreas lingüísticas en bilingües que en monolingües durante la ejecución de estas tareas.

## 2.2 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es avanzar en el conocimiento de los efectos colaterales del bilingüismo en el sistema de control ejecutivo implicado en las tareas de control cognitivo no lingüístico. Para ello se analizarán las diferencias, tanto cerebrales como conductuales, entre bilingües y monolingües cuando realizan diferentes tareas de control cognitivo no relacionado con el lenguaje.

De un modo más específico, los objetivos concretos son:

1. Analizar las posibles diferencias conductuales entre bilingües (tempranos y proficientes) y monolingües respecto a la velocidad (tiempo de respuesta) y la precisión de la respuesta (aciertos/errores) en dos tareas de control de cambio de set que se diferencian en la cantidad de recursos atencionales requeridos para ejecutarlas.
2. Analizar la respuesta hemodinámica cerebral asociada a ambas tareas de cambio de set y explorar las posibles diferencias entre bilingües y monolingües.
3. Estudiar las diferencias en respuesta hemodinámica en la tarea de stop entre bilingües y monolingües, teniendo en cuenta que en esta tarea no se esperan diferencias conductuales.



## 2.3 METODOLOGÍA

La sección experimental de esta tesis está compuesta por 3 estudios. Uno de ellos ha sido publicado en una revista de alto impacto (*Garbin G, Sanjuan A, Forn C, Bustamante JC, Rodríguez-Pujadas A, Belloch V, Hernandez M, Costa A, Ávila C (2011): Bridging language and attention: Brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. Neuroimage, 119: 129-135*), otro ha sido recientemente aceptado para su publicación (*Rodríguez-Pujadas A, Sanjuán A, Ventura-Campos N, Román P, Martín C, Barceló F, Costa A, Ávila C (Plos One): Bilinguals use language-control brain areas more than monolinguals to perform non-linguistic switching tasks*), y el tercero y último está actualmente bajo revisión.

Todos los estudios han sido realizados con una muestra de estudiantes de la Universitat Jaume I de Castellón, de edades comprendidas entre los 20 y los 23 años. La muestra de bilingües está formada por bilingües tempranos y proficientes, es decir, que han tenido un contacto diario y desde la infancia (con un contacto inicial, como máximo, desde los 3 años de edad) con el catalán, haciendo un uso activo de ambas lenguas durante toda su vida y, en consecuencia, recurriendo a la frecuente realización de cambios entre lenguas de manera diaria. Este punto es de crucial importancia, porque la realización de dichos cambios entre lenguas, de manera frecuente y a lo largo de toda la vida, afectaría al desarrollo y funcionamiento del sistema de control ejecutivo, generando diferencias con los monolingües que no realizan dichos cambios.

Por otro lado, la muestra de monolingües, está formada por jóvenes universitarios que, habiendo crecido en una comunidad autónoma con una

única lengua oficial (el castellano) se han trasladado a Castellón (por motivo de estudios, en la misma universidad), llevando como máximo un año viviendo en Castellón.

Todos los participantes rellenaban una serie de cuestionarios en los que se evaluaba su nivel de habilidad lingüística así como su contacto con ambas lenguas en distintos ámbitos vitales. Para ello, se utilizaba el *Cuestionario de Uso de las Lenguas* y otro de frecuencia de uso (ambos cuestionarios se encuentran en el Anexo). Además, para verificar (desde un punto de vista aplicado) su nivel de comprensión o dominio de ambas lenguas, eran sometidos a una entrevista personal.

## 2.4 HIPÓTESIS

### 2.4.1 Generales

La hipótesis subyacente a este estudio se deriva del hecho de que ser bilingüe requiere un control continuo de ambas lenguas durante la producción del habla. Así, los bilingües tempranos y proficientes utilizarían, de manera continua y durante toda su vida, determinadas funciones del sistema de control ejecutivo para poder realizar un correcto uso de sus dos lenguas. Este “sobre-entrenamiento” en el uso de mecanismos de control cognitivo propiciaría un funcionamiento distinto de la red de control cognitivo, que se vería reflejado en tareas que requieran la participación de funciones ejecutivas aún y sin la implicación del lenguaje.

### 2.3.2 Específicas

De un modo mucho más específico, se plantean las siguientes hipótesis previas:

Hipótesis 1: Existirá cierto solapamiento (anatómico y funcional) entre las áreas encargadas del control cognitivo general y del control del lenguaje que será más pronunciado en bilingües que en monolingües.

Hipótesis 2: Los bilingües utilizarán, en mayor medida que los monolingües, áreas cerebrales asociadas al control del lenguaje (lóbulo frontal izquierdo, caudado izquierdo, cíngulo anterior y lóbulo parietal inferior izquierdo) para realizar tareas de control cognitivo no lingüístico.

Hipótesis 3: El uso diferencial de estas áreas no implicará necesariamente una mejor ejecución, sino que se ejercerá de forma independiente. Por ello, se

hallarán diferencias cerebrales independientemente de las diferencias conductuales.

**2.5. Garbin G, Sanjuan A, Forn C, Bustamante JC, Rodríguez-Pujadas A, et al. (2011): *Bridging language and attention: Brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. Neuroimage, 119: 129-135.***





## Bridging language and attention: Brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control

G. Garbin<sup>a</sup>, A. Sanjuan<sup>a</sup>, C. Forn<sup>a</sup>, J.C. Bustamante<sup>a</sup>, A. Rodriguez-Pujadas<sup>a</sup>, V. Belloch<sup>b</sup>, M. Hernandez<sup>c</sup>, A. Costa<sup>c,d</sup>, C. Ávila<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Psychology, Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, Spain

<sup>b</sup> Department of Radiology, ERESA, Valencia, Spain

<sup>c</sup> Department of Technology, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, Spain

<sup>d</sup> Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), Barcelona, Spain

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 11 January 2010

Revised 31 March 2010

Accepted 26 May 2010

Available online 15 June 2010

### ABSTRACT

Using two languages on an everyday basis appears to have a positive effect on general-purpose executive control in bilinguals. However, the neural correlates of this effect remain poorly understood. To investigate the brain bases of the bilingual advantage in executive control, we tested 21 Spanish monolinguals and 19 Spanish-Catalan early bilinguals in a non-verbal task-switching paradigm. As expected based on previous experiments on non-verbal task switching, we found activation in the right inferior frontal cortex and the anterior cingulate of monolingual participants. While bilingual participants showed a reduced switching cost, they activated the left inferior frontal cortex and the left striatum, a pattern of activation consistent with networks thought to underlie language control. Overall, these results support the hypothesis that bilinguals' early training in switching back and forth between their languages leads to the recruitment of brain regions involved in language control when performing non-linguistic cognitive tasks.

© 2010 Elsevier Inc. All rights reserved.

Being a bilingual speaker involves having two equivalent words tagged to the same concept. This means that some sort of language control mechanism needs to be engaged in order to select words of the intended language while avoiding non-target language intrusions. That is, bilingual speakers need not only to decide the message they want to convey, but they also need, in contrast to monolinguals, to do so in the appropriate language for each communicative situation. Furthermore, this implies that on some occasions they need to perform language switching depending on the language that their interlocutor speaks. To account for this ability, different language control mechanisms have been proposed such as inhibition of the unintended language (Green, 1998; Meuter and Allport, 1999) or selective consideration of the intended one (Costa and Caramazza, 1999; Costa et al., 2006; Finkbeiner et al., 2006a,b; La Heij, 2005). Regardless of the specific nature of the control mechanisms that bilinguals engage during speech production, it seems that these mechanisms involve, domain general cognitive control processes (Abutalebi and Green, 2008). That is, every time bilinguals engage language control mechanisms, they are also recruiting cognitive control resources. Thus, one may expect that this much more frequent recruitment of control processes made by bilingual relative to monolingual speakers leads them to develop more efficient cognitive

control mechanisms. Several studies have shown that bilinguals outperform monolinguals in non-linguistic contexts requiring cognitive control, such as Stroop-like tasks (e.g. Bialystok and Martin, 2004; Carlson and Meltzoff, 2008; Costa et al., 2008, 2009; Hernández et al., 2010; Martin-Rhee and Bialystok, 2008). Specifically, the reported bilingual advantage in these tasks consists of overall shorter response latencies across the entire task and/or a smaller attentional cost when facing incongruent items calling for conflicting responses. The impact of bilingualism on the executive control system has been observed across the life span, being more apparent at ages at which this system is either not fully developed (young children) or already decaying (old adults).

Although the impact of bilingualism on cognitive control is a reliable phenomenon, we do not know much about how this life experience actually modulates the brain networks involved in cognitive control. The goal of the present study is to advance on this issue. In particular, we evaluate whether bilingualism has an impact on the brain areas implicated in task switching.

The available evidence regarding a bilingual impact on task switching contexts is rather scarce, indirect and sometimes contradictory (e.g. Costa et al., 2008, 2009). Nevertheless, if bilingualism actually affects the brain structures involved in cognitive control, task switching is precisely one of the psychological processes that should be most affected. This is so because bilingual speakers are often involved in natural task switching contexts, such as language switching. In many bilingual communities, interlocutors often need to carry out bilingual conversations, in which the communication language may change according to

\* Corresponding author. Department of Psicologia, Campus Riu Sec, Fac. Ciències Humanes i Socials, Universitat Jaume I, e-12071 Castelló, Spain. Fax: +34964729267.

E-mail address: [avila@psb.uji.es](mailto:avila@psb.uji.es) (C. Ávila).

URL: <http://www.fmri.uji.es> (C. Ávila).

the interlocutor. This is precisely the sociolinguistic situation of the bilingual individuals tested in our experiment, who grew up in a society in which the two languages are widely spoken and understood, leading to many conversational contexts in which the two languages are at play. Hence, besides the fact that these individuals are high-proficient in the two languages, they actually use both in similar contexts and quite often in the very same conversation. In this context, our hypothesis is that the need for controlling two languages during speech production, plus the language switching practice that these individuals undergo, does actually affect the brain networks involved in the general-purpose cognitive control system.

Consistent with this hypothesis is the relative overlap of the neural circuits involved in handling language switching and general task switching. In a recent literature review, *Abutalebi and Green (2007)* underline the crucial role of the left inferior frontal gyrus (IFG), the anterior cingulate cortex (ACC), the left striatum and the left inferior parietal lobe in bilingual language control (involving switching and inhibitory functions). In situations involving the simultaneous control of multiple languages, the proposed role for the left IFG was of updating the relevant language, inhibiting the language not in use, and correcting for errors. The striatum was proposed to be involved in supervising the language selection, whereas the role of the ACC was to report to the lateral prefrontal cortex for potential response conflict or errors (the dorsal part), and to withhold the language not in use (the ventral part). Finally, the role of the inferior parietal lobe was related to the maintenance of word representations (*Wang et al., 2009*). On the other hand, the literature on the neural basis of general switching using non-linguistic tasks is wider and more heterogeneous. Indeed, the general framework is similar to that proposed for language control, but in the case of the prefrontal cortex, lateralized on the right hemisphere. The main point of agreement between studies on this topic is the crucial role of right IFG in the processes of switching and stopping (*Robbins, 2007*), particularly in the case of verbal responses (*Xue et al., 2008*). The action of the prefrontal cortex is thought to be dopaminergically modulated by the striatum; the co-activation of both structures being important for efficient planning and execution of set shifts (*Monchi et al., 2001, 2004*). The proposed role for the ACC is to detect conflicts, but inhibition of the irrelevant response activation is associated with the right IFG. Also, the left inferior parietal cortex is involved in the maintenance/inhibition of representations.

Given the similarities between brain networks involved in language and general task switching, one might expect to find differences in the neural activity between bilinguals and monolinguals when performing a non-linguistic task switch. These differences may appear either as a modulation of the extent to which a given brain structure is recruited, or as differences in the circuitry engaged in these tasks. Previous evidence suggests that both alternatives are likely to underlie differences between bilinguals and monolinguals (*Bialystok et al., 2005*). Thus, the goal of the present study is to explore the potential differences in the recruitment of brain circuits involved in task switching between bilinguals and monolinguals. Given, the considerations presented above, we will pay special attention to brain areas that have been related to task switching, namely IFG and ACC.

## Methods

### Subjects

A total of 40 university students (18 males, 22 females) at the University Jaume I of Castelló de la Plana were selected for this study. All candidates underwent a preliminary interview to ensure they had no serious physical or psychological impairments, according to the ethical protocol of the University. Participants were asked to answer a questionnaire regarding their personal and familiar language history, followed by an interview on the same topic. By these preliminary steps, the participants were assigned to two separate groups: Spanish-

Catalan early bilinguals [SC, 19 subjects (11 females), mean age = 22.55 years, SD = 4.84 years] and Spanish monolinguals (M, 21 subjects (10 females), mean age = 20.9 years, SD = 3.64 years). There were no statistically significant between-group differences in gender and age. All bilinguals had learned and actively used both languages during the first 4 years of life: 11 bilinguals learnt one language at home and the other in kindergarten, whereas each parent speaks a different language for the rest of bilinguals. Finally, all bilinguals had a perfect command of both languages (comprehension, expression, reading and writing), used both languages continuously throughout their lives and reported regularly having to switch between Spanish and Catalan depending on the interlocutor.

All monolinguals were university students that have been living in monolingual regions of Spain and had gone to study in Castellon around 2 or 3 months before the experiment. Despite the fact that these participants had learned English as a second language in school, they reported a low frequency of English use and a low proficiency in English or any other second language, including Catalan.

Further accuracy in evaluating the healthy conditions of the subjects was taken in the scanner session, via T1- and T2-weighted acquisitions according to a medical standard protocol. These scans were performed as preliminary for all subjects, so they could experience the scanner noise, reduced by large covering earplugs, and help themselves finding the most comfortable position. All participants were paid for their collaboration.

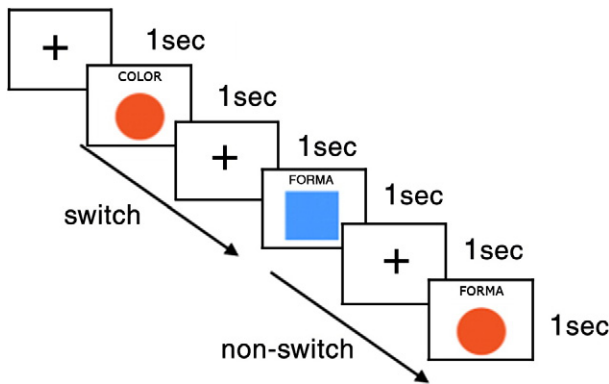
### Task

The stimuli consisted of a square or a circle presented on a white background via MRI-adapted goggles (Resonance Technologies, Inc.). Each figure could be colored red or blue. A written label was presented at the same time as the stimulus at the top of the figure, indicating whether the subject should pay attention to the shape ("FORMA") or color ("COLOR") of the figure. Eight different combinations were thus available by mixing two possible shapes, two colors and two labels. The participants were instructed to push one of the two buttons of the ResponseGrip (Nordic NeuroLab AS, Bergen, Norway) with their right hand when they recognized an upcoming stimulus, according to the following rules: one button if the figure was a circle (when the cue was: "Shape") or red ("Color"), whereas the other button if the figure was a square ("Shape") or blue ("Color"). The response buttons were counterbalanced across subjects. A fixation cross was presented in the center of the screen one second before the stimulus. Each subject was trained with an 8-min session before entering the scanner. They also received a further 5-min training inside the scanner while running a short fMRI session to reduce the possibility of arousal effects during the proper experiment sessions which followed.

Stimuli were presented using the Presentation software package (Neurobehavioral Systems, Inc., Albany, CA), which ran on a Microsoft XP platform. The inter-stimulus interval (ISI) was set to 2000 ms and each stimulus lasted 1000 ms. The stimuli were pseudo-randomly interleaved by 0, 1, 2 or 3 blank null events (each lasting 2000 ms) during which a fixation cross was presented. Visual presentation was synchronized with the scanner via a SyncBox (Nordic NeuroLab AS, Bergen, Norway).

The experimental session consisted of two consecutive runs of 7 min and 5 s each, with a differently randomized presentation of stimuli. Each run consisted in 215 volume acquisitions. Within these, a total of 100 stimuli were presented in order to obtain 30 "switch" and 30 "non-switch" conditions per run. A "switch" event was defined as the condition of changing the set to be used (shape-color or color-shape trials). A "non-switch" event was occurred when the response set did not differ between consecutive trials (shape-shape or color-color). *Fig. 1* illustrates the experimental conditions. The possibility of a switch or a non-switch condition was considered only between consecutive trials; when one or more null events were interspersed between two stimuli, the upcoming stimulus was considered a "first





**Fig. 1.** Stimuli and task Conditions. Switching and Non-switch conditions: a “switch” event was defined as the condition of changing the set to be used in order to answer the upcoming stimulus in relation to the previous one (shape–color or color–shape trials). Coherently, a “non-switch” event was assumed to happen when the subject answered the upcoming stimulus with the same set as the previous one (shape–shape or color–color).

event” and was modeled separately. To ensure good spectral density in variance for both “switch” and “non-switch” conditions, a total of 115 null events were introduced into each run. Ten pseudo-random sequences were evaluated by performing a simulation with SPM2, which allows analysing spectral density previously without actually specifying any image, and by finally selecting those with the best spectral density in both conditions.

#### MRI parameters

All the sessions were performed in a 1.5-T MRI Siemens Avanto scanner. The acquisition plane was set as axial and oriented so that the rostral and caudal extremities of the corpus callosum both lay on the same plane. The fMRI sessions parameters were as follows: single-shot echo-planar, TR/TE = 2000/45 ms, axial matrix = 64 × 64, slice thickness = 4 mm, FOV = 210 × 210 mm, resulting voxel size = 3.28 × 3.28 × 4 mm, number of slices = 29, flip angle = 90°.

#### Data analysis

The analysis was performed with SPM5 (The Wellcome Institute of Neurology, London, UK). Images were first realigned and unwrapped, then normalized to MNI space (Collins et al., 1994) by using the standard echo-planar imaging template and setting the mean realigned image as reference. Smoothing was applied with an 8-mm (full width at half maximum) 3D Gaussian kernel. In the first level analysis, a general linear model incorporating both runs was performed for each subject, modeling the switch events, the non-switch events and the first event separately. Translational and rotational motion parameters were included as regressors. A high-pass filter (128 s) was applied to the functional data. Each event onset was convolved by using the canonical HRF. From this first level, we computed t-images of parameter estimates for the comparison between the switch and non-switch conditions (switch > non-switch) at each voxel for every subject. The resulting images of parameter estimates were used in the second-level random effect analysis to explore average effects within groups and differences between them. At this second level, we performed a full factorial analysis, with the two linguistic groups (bilinguals, monolinguals) as factors and including averaged RTs and errors as regressors. Each regressor was defined as the difference between the average values for switch and non-switch events. We also applied global (AnCova) normalization.

Exploratory analyses over the whole brain volume were initially evaluated at an uncorrected threshold of  $p < 0.001$  ( $k > 10$ ). Small volume correction (SVC) was then performed over a priori regions of interest (ROI) related to inhibitory and language control. Six different ROIs were

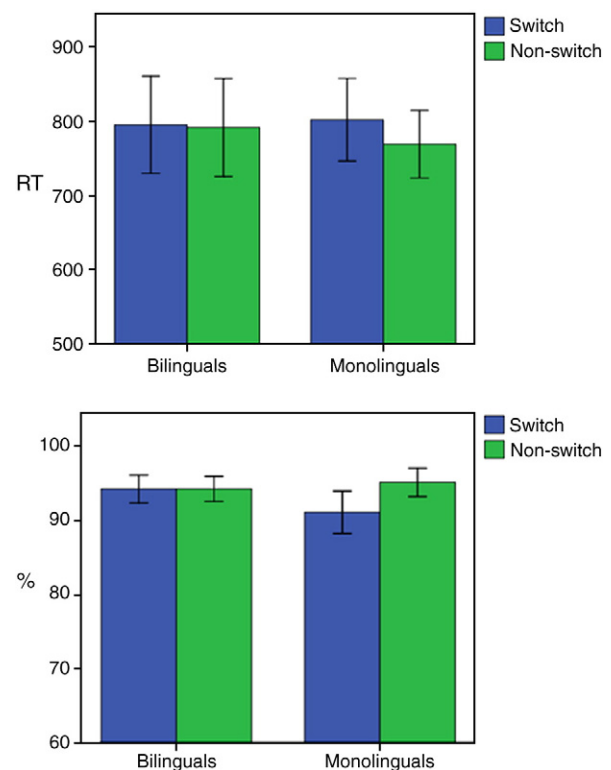
defined: (1) according to task switching studies (Aron et al., 2004; Xue et al., 2008), the right IFC, which represented the common response inhibition center, was defined as the region including right pars opercularis of the inferior frontal cortex and adjacent insular cortex and (2) the left IFC was defined as the homologous part in the left prefrontal cortex; (3) the left striatum was defined using structural templates derived from the WFU Pickatlas (Maldjian et al., 2003); (4) the homonymous right striatum; (5) the dorsal anterior cingulate; and (6) the inferior parietal lobe. The resulting activation underwent SVC for multiple comparisons applied at  $p < 0.05$ . We also performed regression correlation analysis separately for each group using the difference between RTs in switch and non-switch trials. A statistical threshold of  $p < 0.005$  uncorrected and a  $k > 10$  was used for these analyses, subsequently applying SVC on ROIs, as mentioned above.

Anatomical labeling of activations was checked with MSU tool (Sergey Pakhomov, [www.ihb.spb.ru](http://www.ihb.spb.ru)) and T2T-Muenster converter (Olaf Steinstrater, [www.uni-muenster.de](http://www.uni-muenster.de)) and rendered by overlaying activations onto the ch2better template provided by MRIcroN (Chris Roden, ver.8, 2008).

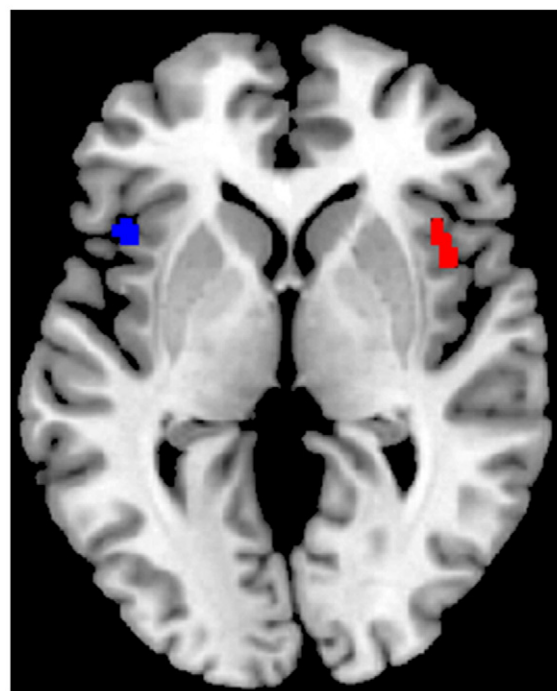
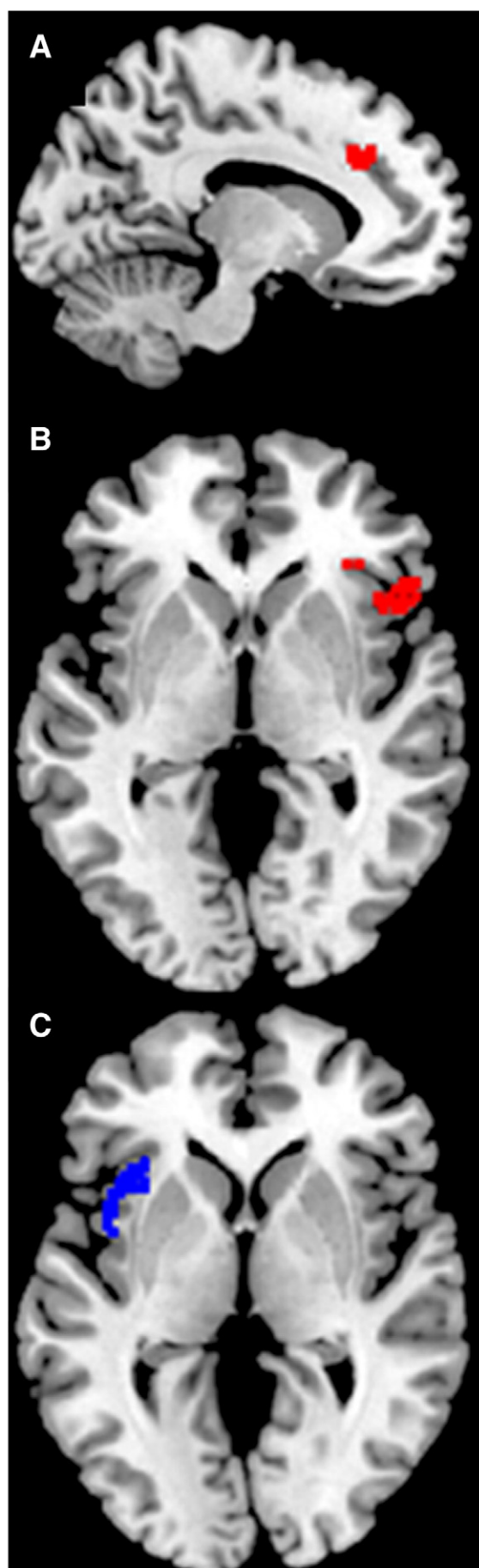
## Results

### Behavioral performance

Data on accuracy and reaction times (for correct trials only) to the different stimulus categories are summarized in Fig. 2. Accuracy and RTs were analyzed using a mixed-model ANOVA including Trial (Switch vs. Non-switch) as a within-subjects factor and Group (Bilinguals vs. Monolinguals) as a between-subjects factor. Results for accuracy revealed a significant effect for Trial ( $F(1,39) = 8.63, p < 0.01$ ), indicating a better performance for non-switch than switch trials. However, this effect was modulated by the Trial × Group significant interaction ( $F(1,39) = 8.63, p < 0.01$ ). This interaction showed that the Trial effect was mainly due to the Monolingual group.



**Fig. 2.** Behavioral performance of bilinguals and monolinguals in switching and non-switching events. Average values of reaction time (RT, in milliseconds) and accuracy (percentage of correct responses) in each group for the two conditions.



**Fig. 4.** Differential involvement of the inferior frontal gyrus (IFG) in monolinguals and bilinguals. Between-groups comparison showing increased activation in the left IFG in bilinguals vs. monolinguals ( $p < 0.003$ , uncorrected, blue cluster) and contra-laterally in the opposite comparison ( $p_{FWE} < 0.05$ , SVC, red cluster).

Analyses of RTs also obtained a Trial effect [ $F(1,39) = 6.21$ ,  $p < 0.02$ ], indicating faster RTs for non-switching than switching trials. Again, this effect was modulated by the almost significant Trial  $\times$  Group interaction ( $F(1,39) = 4.05$ ,  $p = 0.051$ ), that again reveals that the Trial effect was mainly due to the Monolingual group.

Hence, in accordance with some previous results (Prior and MacWhinney, 2010), the behavioral data showed a larger switching cost for monolinguals than bilinguals.

#### Imaging data

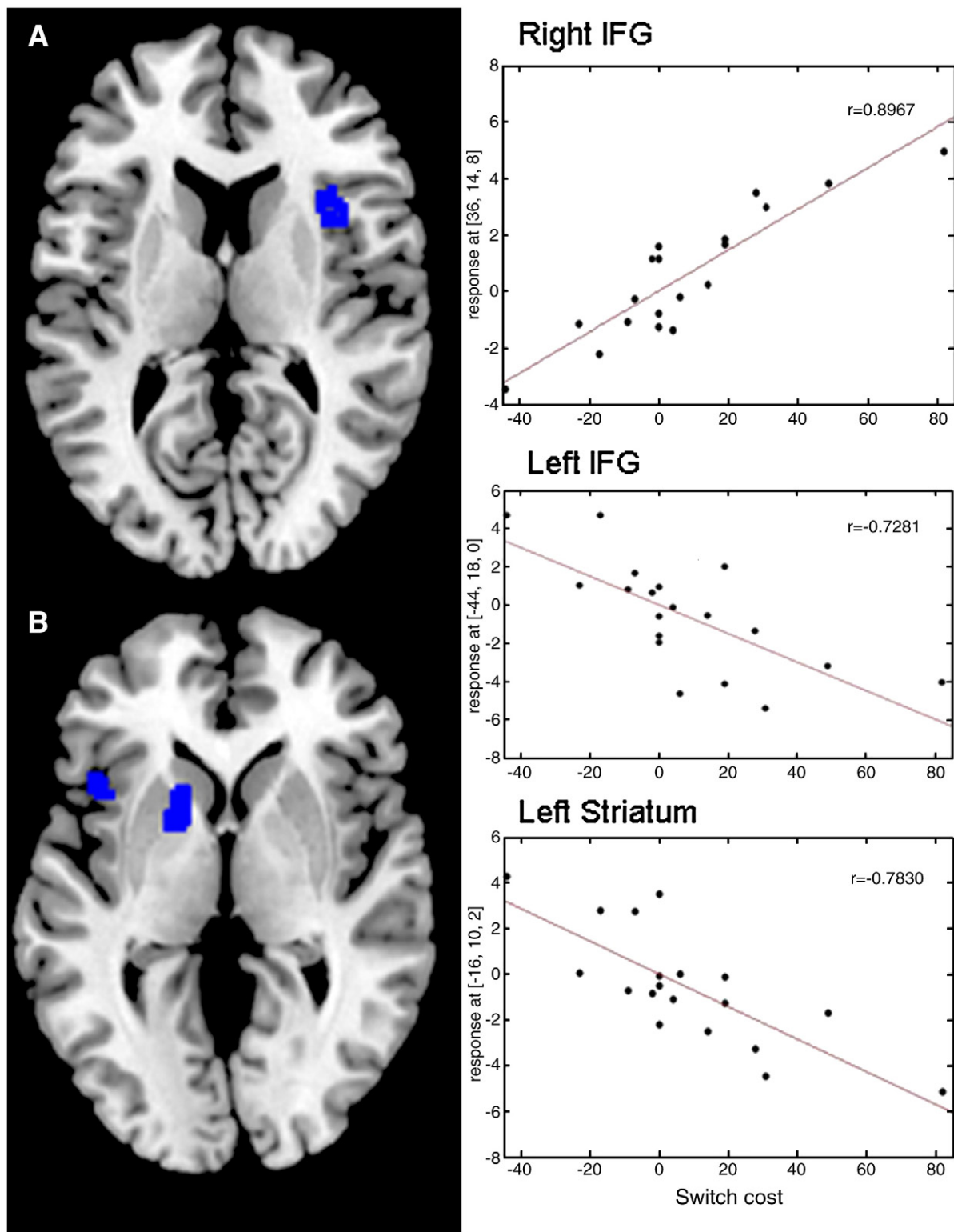
##### Within-group activations

fMRI results for each group were analyzed using a one-sample  $t$ -test (Fig. 3). Compared with non-switch trials, switch trials in the bilingual group were associated with a cluster of activation with its peak in the left IFG/Insula (MNI coordinates  $-34, 20, 4$ ;  $T = 4.55$ ,  $k = 96$ ,  $p(FWE) < 0.04$  SVC). In monolinguals, the same comparison activated a larger number of areas including the right IFG/insula (MNI  $36, 30, -4$ ;  $T = 4.31$ ,  $k = 39$ ,  $p(FWE) < 0.05$  SVC), the ACC (MNI  $-14, 30, 30$ ;  $T = 5.16$ ,  $k = 12$ ,  $p(FWE) < 0.008$  SVC) and the left inferior parietal lobe (MNI  $-50, -52, 54$ ;  $T = 4.15$ ,  $k = 12$ ,  $p < 0.001$  uncorrected). Other activations are shown in Supplementary Table 1.

##### Between-groups activations

Between-group analysis was conducted using AnCova including average RTs and number of errors as covariates in a full factorial design. This analysis was conducted to establish whether neural activation differences could be attributed to differential task performance. A

**Fig. 3.** Brain regions involved in task switching for monolinguals and bilinguals. Within-group results at  $p_{FWE} < 0.05$  (SVC): switching vs. non-switching events result in increased oxygen consumption in the left AAC and right IFG in monolinguals (sagittal and axial views, red clusters), while bilinguals show increased BOLD signal in the left IFG (axial view, blue cluster).



**Fig. 5.** Performance correlates of switching for bilinguals. Regions having positive or negative correlation with RT difference (i.e., active in subjects having slower or faster performance) in bilinguals: positive correlation with RT difference in the right IFL ( $p(\text{FWE}) < 0.05$ , SVC) and negative correlation in the left Putamen and IFL.

separate analysis without covariates yielded similar results and is available upon request. Results of the ANCOVA analysis appear in Fig. 4. Relative to bilingual participants, monolinguals showed increased activation in the right IFG/insula (MNI 38, 14, 8;  $T=5.24$ ,  $k=77$ ,  $p(\text{FWE}) < 0.005$  SVC). In the comparison between bilinguals and monolinguals, no significant clusters were obtained in the regions of interest. However, the activation on the left IFG/insula approached significance

(MNI -44, 18, 0;  $T=3.19$ ,  $k=22$ ,  $p < 0.003$  uncorrected). Other differences between both groups appear in Supplementary Table 1.

#### Performance correlates

Regression analyses for each group were conducted using the mean difference between RTs in switch and non-switch trials as a regressor to ascertain the behavioral correlates of the task. The analysis for bilinguals



obtained positive correlations between the regressor and activations in the right IFG/insula (MNI 36, 14, 8;  $T = 8.38$ ,  $k = 44$ ,  $p(\text{FWE}) < 0.02$  SVC). The activations of the left striatum (MNI -16, 10, 2;  $T = 5.02$ ,  $k = 48$ ,  $p < 0.001$  uncorrected) and the left IFG/insula (MNI -44, 16, 0;  $T = 3.29$ ,  $k = 11$ ,  $p < 0.003$  uncorrected) were associated to faster switching. The same analyses for monolinguals yielded no significant positive or negative correlations between the regressor and the brain activation for the predefined ROIs. Results of these analyses appear in Fig. 5 and Supplementary Table 2.

## Discussion

In this study, bilinguals and monolinguals were asked to perform a non-linguistic switching task. Both groups of participants showed different patterns of switching costs, both behaviorally and, more importantly, in terms of neuronal recruitment. First, while monolinguals showed a significant switching cost both in RTs and error rates, bilinguals did not show any significant difference between switch and non-switch trials (see also Prior and MacWhinney, 2010). Second, and more importantly, the brain activity for both groups of participants was modulated by the type of trial (switch vs. non-switch trial). That is, switch trials elicited a different pattern of brain activity when compared with non-switch trials. Third, and crucially for our goal in this study, the brain activity associated with the switching cost was qualitatively different for both groups of participants, revealing some fundamental differences in the cortical networks engaged in the switching task between bilinguals and monolinguals. We will discuss the implications of these results below.

The brain activity associated with switching the cognitive set in monolinguals revealed larger oxygen consumption in right IFG, ACC and left inferior parietal lobe for switch trials as compared to non-switch trials. This activation pattern is largely consistent with previous literature indicating that these brain areas are fundamental to the monitoring and inhibitory processes, respectively, that are thought to take place in non-linguistic switching tasks (Botvinick et al., 2004; Hedden and Gabrieli, 2010; Hyafil et al., 2009; Robbins, 2007; Woodward et al., 2008; Xue et al., 2008). Importantly, the switch-related modulation of activity in these areas for monolinguals was not present in the case of bilinguals. This suggests that the processes housed by these brain areas are involved in switching the cognitive set in monolinguals but not in bilinguals.

The brain activity associated with switching the cognitive set in the case of bilinguals was clearly different. The only area significantly modulated by type of trial was the left IFG. Furthermore, this area was more activated in switching trials only for the bilingual group and not for the monolingual one. As stated above, the ACC the right IFG and the left inferior parietal lobe were not associated with switching the cognitive set in bilingual speakers.

Before interpreting these neural differences, it is important to keep in mind that bilinguals did not show any behavioral effects associated with set switching. This lack of a switching cost may stem from the fact that the task was too easy. In fact, the switching cost for monolinguals was significant (32 ms) and comparable with previous fMRI studies (Gu et al., 2008). If bilinguals indeed have an advantage in cognitive control, it is then not surprising that they experienced a reduction in switching costs (4 ms). In fact, previous studies have found no switching costs for bilinguals in tasks in which monolinguals did exhibit them (Prior and MacWhinney, 2010; Bialystok and Viswanathan, 2009; Costa et al., 2008). However, what is more relevant for our present purposes is the presence of a difference in brain activity associated with switch and non-switch in left IFG.

The striking differences in the pattern of brain activation between bilinguals and monolinguals call for an interpretation of the bilingual effect in cognitive control in terms of qualitative differences. We will focus on the role of the left and right IFG. Robbins (2007) proposes a different role of these two structures in switching tasks. The right IFG

would be engaged in the reactive inhibition to an exogenous cue, a process that needs endogenous control to reconfigure the response to the new relevant conditions. According to this view, the greater activation of this area for monolinguals may actually reveal the need to endogenously suppress task inertia derived from the previous set. In contrast, the proposed role for the left IFG is the suppression of inappropriate responses on switch tasks. Interestingly, patients with lesions in this area showed “a more general difficulty in imposing the appropriate task set..., consistent with a reduction of endogenous control and thus leading to an exaggerated influence of the exogenous cueing of task set” (Robbins, 2007). The greater involvement of the left IFG in bilinguals may index their better ability to establish the appropriate response set to each stimulus, a strategy that would facilitate performance in conflict tasks (Bialystok and Martin, 2004; Bialystok and Viswanathan, 2009; Carlson and Meltzoff, 2008; Costa et al., 2008, 2009; Hernández et al., 2010; Martin-Rhee and Bialystok, 2008). The fact that the amount of activation in this area correlates negatively with the magnitude of the switch cost is largely consistent with this interpretation.

Other ROIs have also yielded interesting results. First, the activity in the striatum (i.e., putamen) was related to a reduced switch cost, confirming its role in the efficient planning and execution of a set shift. As the task involved motor planning as a function of the actual cue, putaminal activity may be needed for the efficient selection/execution of the response. Why is this activity specific for bilinguals? We do not have a clear answer to this question, but we may speculate that early bilinguals have a special development of this area since the left putamen plays an important in motor programming of L2 in these subjects (Chan et al., 2008; Dodel et al., 2005; Klein et al., 1994). Second, the inferior parietal lobe and the ACC have been involved in task switching for monolinguals, but not for bilinguals. Similar to the right IFG, these brain areas have been previously shown to be involved in task switching. The activation of the left inferior parietal lobe have consistently observed in shifting tasks (Wager et al., 2004; Hedden and Gabrieli, 2010), and its role is thought to reflect the maintenance of representations of the previous set. The activation of ACC is observed during situations requiring cognitive control (Cohen et al., 2000). In line with results of the right IFG, these tasks may activate the classical cortical areas involved in task switching.

Overall behavioral and neural differences between monolinguals and bilinguals are consistent with the idea that both groups may have a different development of brain networks associated with the control of executive functions. The involvement of the left IFG in the switching performance of bilingual speakers highlights the relationship between language control and the general-purpose cognitive control system. Indeed, it suggests that early experience with two languages may have a long lasting consequence for the establishment of the cognitive control network, leading to the involvement of language control brain areas in non-linguistic switching tasks. A further question that needs to be addressed is the specific impact of several variables (e.g. age of acquisition, language use, language proficiency) in the organization of the brain control network.

To conclude, our study shows striking differences in the cortical network involved in cognitive control between monolinguals and bilinguals. The most interesting difference is the involvement of left IFG and the left striatum in non-linguistic switching tasks for bilinguals, whereas monolinguals activated the right IFG. The fact that the left IFG has been consistently related to bilingual language control is suggestive of a certain degree of overlap between the cortical network responsible for language control and general-purpose non-linguistic cognitive control in the case of bilinguals but not in monolinguals.

## Acknowledgments

This study was supported by two grants of the Spanish Ministry of Science and Technology given to Cesar Avila [the BrainGlot Project,

CSD2007-0012 (funded by the Consolider-Ingenio 2010 program) and grant SEJ2007-65929/PSIC] and a grant given to Albert Costa (PSI2008-01191). The authors wish to thank Ian FitzPatrick for his comments on the manuscript.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at doi:10.1016/j.neuroimage.2010.05.078.

## References

- Abutalebi, J., Green, D., 2007. Bilingual language production: the neurocognition of language representation and control. *J. Neurolinguistics* 20, 242–275.
- Abutalebi, J., Green, D., 2008. Control mechanisms in bilingual language production: neural evidence from language switching studies. *Lang. Cogn. Processes* 23, 557–582.
- Aron, A.R., Monsell, S., Sahakian, B.J., Robbins, T.W., 2004. A componential analysis of task-switching deficits associated with lesions of left and right frontal cortex. *Brain* 127, 1561–1573.
- Bialystok, E., Martin, M., 2004. Attention and inhibition in bilingual children: evidence from the dimensional change card sorting task. *Dev. Sci.* 7, 325–339.
- Bialystok, E., Viswanathan, M., 2009. Components of executive control with advantages for bilingual children in two cultures. *Cognition* 112 (3), 494–500.
- Bialystok, E., Craik, F.I., Grady, C., Chau, W., Ishii, R., Gunji, A., Pantev, C., 2005. Effect of bilingualism on cognitive control in the Simon task: evidence from MEG. *Neuroimage* 24, 40–49.
- Botvinick, M.M., Cohen, J.D., Carter, C.S., 2004. Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends Cogn. Sci.* 8, 539–546.
- Carlson, S.M., Meltzoff, A.M., 2008. Bilingual experience and executive 651 functioning in young children. *Dev. Sci.* 11, 282–298.
- Chan, A.H., Luke, K.K., Li, P., Yip, V., Li, G., Weekes, B., Tan, L.H., 2008. Neural correlates of nouns and verbs in early bilinguals. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1145, 30–40.
- Cohen, J.D., Botvinick, M., Carter, C.S., 2000. Anterior cingulate and prefrontal cortex: who's in control? *Nat. Neurosci.* 3, 421–423.
- Collins, D.L., Neelin, P., Peters, T.M., Evans, A.C., 1994. Automatic 3D intersubject registration of MR volumetric data in standardized Talairach space. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 18, 192–205.
- Costa, A., Caramazza, A., 1999. Is lexical selection in bilingual speech production language-specific? Further evidence from Spanish–English and English–Spanish bilinguals. *Biling. Lang. Cogn.* 2, 231–244.
- Costa, A., Santesteban, M., Ivanova, I., 2006. How do highly proficient bilinguals control their lexicalization process? Inhibitory and language-specific selection mechanisms are both functional. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 32, 1057–1074.
- Costa, A., Hernandez, M., Sebastian-Galles, N., 2008. Bilingualism aids conflict resolution: evidence from the ANT task. *Cognition* 106, 59–86.
- Costa, A., Hernández, M., Costa-Faidella, J., Sebastián-Gallés, N., 2009. On the bilingual advantage in conflict processing: now you see it, now you don't. *Cognition* 113, 135–149.
- Dodel, S., Golestani, N., Pallier, C., Elkouby, V., Le Bihan, D., Poline, J.B., 2005. Condition-dependent functional connectivity: syntax networks in bilinguals. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 60, 921–935.
- Finkbeiner, M., Almeida, J., Janssen, N., Caramazza, A., 2006a. Lexical selection in bilingual speech production does not involve language suppression. *JEP: Learn. Mem. Cogn.* 32, 1075–1089.
- Finkbeiner, M., Gollan, T.H., Caramazza, A., 2006b. Lexical access in bilingual speakers: what's the (hard) problem? *Biling. Lang. Cogn.* 9, 153–166.
- Hedden, T., Gabrieli, J.D., 2010. Shared and selective neural correlates of inhibition, facilitation, and shifting processes during executive control. *Neuroimage* 51, 421–431.
- Hyafil, A., Summerfield, C., Koehlin, E., 2009. Two mechanisms for task switching in the prefrontal cortex. *J. Neurosci.* 29, 5135–5142.
- Hernández, M., Costa, A., Fuentes, L.J., Vivas, A.B., Sebastián-Gallés, N., 2010. The impact of bilingualism on the executive control and orienting networks of attention. *Bilingualism: Language and Cognition* 13, 315–325.
- Green, D.W., 1998. Mental control of the bilingual lexico-semantic system. *Biling. Lang. Cogn.* 1, 67–81.
- Gu, B.M., Park, J.Y., Kang, D.H., Lee, S.J., Yoo, S.Y., Jo, H.J., Choi, C.H., Lee, J.M., Kwon, J.S., 2008. Neural correlates of cognitive inflexibility during task-switching in obsessive-compulsive disorder. *Brain* 131, 55–64.
- Klein, D., Zatorre, R.J., Milner, B., Meyer, E., Evans, A.C., 1994. Left putaminal activation when speaking a second language: evidence from PET. *Neuroreport* 5, 2295–2297.
- La Heij, W., 2005. Selection processes in monolingual and bilingual lexical access. In: Kroll, J.F., de Groot, A.M.B. (Eds.), *Handbook of Bilingualism*. Oxford University Press, Oxford, pp. 289–307.
- Maldjian, J.A., Laurienti, P.J., Burdette, J.H., Kraft, R.A., 2003. An automated method for neuroanatomic and cytoarchitectonic atlas-based interrogation of fMRI data set. *Neuroimage* 19, 1233–1239.
- Martin-Rhee, M.M., Bialystok, E., 2008. The development of two types of inhibitory control in monolingual and bilingual children. *Biling. Lang. Cogn.* 11, 81–93.
- Meuter, R.F.I., Allport, A., 1999. Bilingual language switching in naming. Asymmetrical costs of language selection. *J. Mem. Lang.* 40, 25.
- Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., et al., 2001. Card-sorting revisited: distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related fMRI. *J. Neurosci.* 21, 7733–7741.
- Monchi, O., Petrides, M., Doyon, J., Postuma, R.B., Worsley, K., Dagher, A., 2004. Neural bases of set-shifting deficits in Parkinson's disease. *J. Neurosci.* 24, 702–710.
- Prior, A., MacWhinney, B., 2010. A bilingual advantage in task switching. *Bilingualism: Language and Cognition* 13 (2), 253–262.
- Robbins, T.W., 2007. Shifting and stopping: fronto-striatal substrates, neurochemical modulation and clinical implications. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 362, 917–932.
- Wager, T.D., Jonides, J., Reading, S., 2004. Neuroimaging studies of shifting attention: a meta-analysis. *Neuroimage* 22, 1679–1693.
- Wang, Y., Kuhl, P.K., Chen, C., Dong, Q., 2009. Sustained and transient language control in the bilingual brain. *Neuroimage* 47, 414–422.
- Woodward, T.S., Metzack, P.D., Meier, B., Holroyd, C.B., 2008. Anterior cingulate cortex signals the requirement to break inertia when switching tasks: a study of the bivalency effect. *Neuroimage* 40, 1311–1318.
- Xue, G., Aron, A.R., Poldrack, R.A., 2008. Common neural substrates for inhibition of spoken and manual responses. *Cereb. Cortex* 18, 1923–1932.

## Supplementary Material

Supplementary Table 1: regions of activation for separate groups and groups comparison over a threshold of  $p < 0.001$ , uncorrected, and minimum cluster extension of 10 contiguous voxels ( $k=10$ ). The areas are intended for separate analyses of Monolinguals and Bilinguals group (M, B), and mutual comparisons having set the difference in reaction times as regressor ( $M > B$ ,  $B > M$ ). The areas regarding activations at  $p < 0.05$  (FWE) are described in the results section and hence omitted here.

$p < 0.001$ (uncorr.)	Region	BA	k	T	MNI
M	L, Middle Frontal Gyrus	8	29	6.05	-28 30 50
	L, Middle Frontal Gyrus	10	34	5.19	-44 50 8
	L, Middle Frontal Gyrus	8	16	4.54	-22 20 50
	L, Inferior Parietal Lobule	40	12	4.15	-50 -52 54
	L, Cingulate Gyrus	9/32	41	5.16	-14 30 30
	R, Inferior Frontal Gyrus	47	14	4.65	34 30 -4
	R, Middle Frontal Gyrus	11	11	4.31	28 46 -10
B	L, Inferior Frontal Gyrus	13/47	30	4.83	-34 20 2
	R, Middle Frontal Gyrus	8	16	4.87	46 14 48
$M > B$	L, Medial Frontal Gyrus	10	149	5.57	-6 60 16
	L, Middle Frontal Gyrus	8	96	5.55	-24 30 56
	L, Parietal Lobe, Precuneus	31	16	3.99	-12 -58 34
	R, Inferior Frontal Gyrus	13/44	54	5.45	36 14 8
$B > M$	R, Middle Frontal Gyrus	10	18	4.13	38 40 28

Supplementary Table 2: regions of BOLD difference having positive and negative correlation with reaction time difference (RT+, RT-) in Monolinguals and Bilinguals separate groups. All results are intended over a threshold of  $p < 0.005$ , uncorrected, and for minimum cluster extension of 10 contiguous voxels ( $k=10$ ).

	Region	BA	k	p (uncorr.)	T	MNI
M, RT+	L, Middle frontal Gyrus	10	10	0.002	3.33	-32 44 10
	L, Inferior Parietal Lobule	40	10	0.001	3.57	-54 -30 32
	R, Middle frontal Gyrus	10	28	0.001	3.54	32 36 22
	R, Middle frontal Gyrus	6	12	0.001	3.73	36 12 50
M, RT-	L, Insula	13	72	0.000	6.10	-32 -2 12
	L, Cingulate Gyrus	24	21	0.001	3.71	4 0 38
	R, Cingulate Gyrus	24	20	0.003	3.12	-2 2 34
B, RT+	R, Inferior frontal lobe	13	65	0.000	8.38	36 14 8
	L, Insula	13	90	0.000	5.79	-36 -2 16
	L, Subthalamic nucleus		113	0.000	6.85	-12 -18 0
	R, Subthalamic nucleus		78	0.001	3.95	12 -20 4
B, RT-	L, Inferior Frontal Gyrus	47	11	0.002	3.29	-44 16 0
	L, Superior Frontal Gyrus	10	17	0.001	3.61	-34 48 28
	L, putamen		48	0.000	5.02	-16 10 2





**2.6. Rodríguez-Pujadas A, Sanjuán A, Ventura-Campos N, et al. (2013):**  
***Bilinguals use language-control brain areas more than monolinguals to***  
***perform non-linguistic switching tasks. PLoS ONE, 8(9): e73028.***  
**doi:10.1371/journal.pone.0073028**



# Bilinguals Use Language-Control Brain Areas More Than Monolinguals to Perform Non-Linguistic Switching Tasks

Aina Rodríguez-Pujadas<sup>1\*</sup>, Ana Sanjuán<sup>1</sup>, Noelia Ventura-Campos<sup>1</sup>, Patricia Román<sup>1,2</sup>, Clara Martín<sup>3,4,5</sup>, Francisco Barceló<sup>6</sup>, Albert Costa<sup>3,7</sup>, César Ávila<sup>1</sup>

**1** Department of Psychology, Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, Spain, **2** Department of Psychology, Penn State University, University Park, Pennsylvania, United States of America, **3** Department Technology, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, Spain, **4** Basque Center on Cognition, Brain and Language, Donostia, Spain, **5** IKERBASQUE, Bilbao, Spain, **6** Department of Psychology, University of the Balearic Islands, Palma, Balearic Islands, Spain, **7** Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, Barcelona, Spain

## Abstract

We tested the hypothesis that early bilinguals use language-control brain areas more than monolinguals when performing non-linguistic executive control tasks. We do so by exploring the brain activity of early bilinguals and monolinguals in a task-switching paradigm using an embedded critical trial design. Crucially, the task was designed such that the behavioural performance of the two groups was comparable, allowing then to have a safer comparison between the corresponding brain activity in the two groups. Despite the lack of behavioural differences between both groups, early bilinguals used language-control areas – such as left caudate, and left inferior and middle frontal gyri – more than monolinguals, when performing the switching task. Results offer direct support for the notion that, early bilingualism exerts an effect in the neural circuitry responsible for executive control. This effect partially involves the recruitment of brain areas involved in language control when performing domain-general executive control tasks, highlighting the cross-talk between these two domains.

**Citation:** Rodríguez-Pujadas A, Sanjuán A, Ventura-Campos N, Román P, Martín C, et al. (2013) Bilinguals Use Language-Control Brain Areas More Than Monolinguals to Perform Non-Linguistic Switching Tasks. PLoS ONE 8(9): e73028. doi:10.1371/journal.pone.0073028

**Editor:** Antonio Verdejo García, University of Granada, Spain

**Received:** March 27, 2013; **Accepted:** July 17, 2013; **Published:** September 13, 2013

**Copyright:** © 2013 Rodríguez-Pujadas et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Funding:** This work was supported by two grants of the Spanish Ministry of Science and Technology given to CA (the BrainGlot Project, CSD2007-00012 (funded by the Consolider-Ingenio 2010 programme), and the grant PSI2010-20168) and a grant given to AC (PSI2008-01191). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

**Competing Interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

\* E-mail: pujadas@psb.uji.es

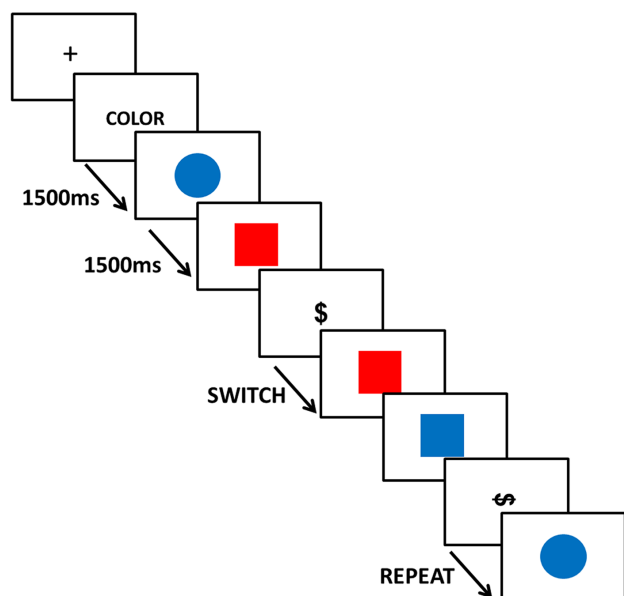
## Introduction

It is now well-accepted that the continuous and extensive training of language-control abilities in bilingual speakers affects the development and functioning of executive control (EC) systems. For example, bilinguals tend to outperform monolinguals in tasks that involve conflict resolution and monitoring, set shifting, etc. [1], [2], [3]. At present, however, much less is known about the impact of bilingualism on the brain organization of EC functions. Indeed, the few studies that have addressed this issue suggest that bilingualism does not only affect the efficiency of the EC functioning, but also the brain structures recruited when performing EC tasks [4], [5], [6], [7]. The main aim of the present study is to further advance in our knowledge of the impact of bilingualism on the brain networks involved in EC. In particular, we put to test the hypothesis that bilinguals will recruit language related areas when performing EC tasks to a larger extent than monolinguals.

It is widely accepted that the two languages of a bilingual are constantly active both when comprehending and producing language. Despite this co-activation, language control failures that lead to cross-language intrusions are scarce, at least in high-proficient bilinguals, revealing the excellent language control abilities develop by bilinguals. This language control system is sustained by a set of left lateralized brain areas [8]. Concretely, a brain network that involves the left inferior frontal gyrus, the left

caudate, the left inferior parietal lobe and the anterior cingulate has been proposed as the main areas involved in language control. Therefore, as a result of the acquisition of two languages during early age, bilingual speakers continuously and extensively train this language control network.

Language control may be considered a special case of executive control. The mechanisms of executive control recruited to resolve competition between linguistic representations may be similar to those recruited when resolving competition between representations in perception and attention [9]. In fact, brain areas related to the control of executive processes are the bilateral inferior and medial frontal cortex, the caudate and the anterior cingulate [10], [11], and include those related to language control. In this context, it seems reasonable to hypothesise a cross-talk between the processes engaged in domain general executive control and those involved in language control. Indeed, such cross-talk is at the basis of current explanations of the observed bilingual advantage in executive control tasks that minimally involve language such as switching tasks and conflict resolution tasks [12]. A recent review of this behavioral evidence has served to outline the specific differences between monolinguals and bilinguals in executive processes [3]. They concluded that both groups did not differ in inhibitory processes, but bilinguals showed domain-general executive functioning advantages manifested in a more efficient processing when performed interference task. Importantly, these



**Figure 1. Task.** Schematic of the serial visual presentation of stimulus displayed during the scan session.  
doi:10.1371/journal.pone.0073028.g001

advantages are observed when the monitoring or attentional resources required to perform the task are high [2], [13].

Beyond the presence of such a cross-talk, our knowledge about the specific way in which bilingual language control alters the brain networks of individuals when performing non-linguistic executive control tasks is rather limited. One appealing possibility is that bilingual language control may impact in a qualitative (and not just in a quantitative) way the organization of cognitive control network, leading to the involvement of language-control brain areas in non-linguistic switching tasks [5]. In the present study, we intended to further test this original hypothesis by comparing the neural substrates of task switching in bilinguals and monolinguals in the absence of any group differences in task performance. This last feature is important, since any difference in the neural activation between these two groups could not be attributed to differences in behavioral performance, hence allowing a cleaner attribution to such brain modulation to the bilingual status of the participant.

With this purpose in mind, participants were submitted to a non-linguistic task-switching paradigm with low-monitoring demands [14]. Manipulation of the task's monitoring demands is relevant here because it has already been shown that the behavioural impact of bilingualism on EC tasks is reduced (or even absent) when the task at hand does not involve a high magnitude of the conflict effect [13]. However, given the early experience of bilinguals in managing two languages, we expected to find brain differences between groups even in absence of behavioral differences. In the sense, we hypothesize that language-control areas (i.e., left inferior frontal gyrus, left inferior parietal, left caudate and left ACC [15]) would be more activated in bilinguals than in monolinguals in the low-monitoring task switching of the present study. Comparing the two groups in a task that does not lead to differences in performance, as this will ease the interpretation of any potential brain differences between groups.

## Materials and Methods

### 1. Participants

The study was approved by Universitat Jaume I's ethics committee. Also, in accordance with the Universitat Jaume I's ethical protocol, each participant handed in a written informed consent to participating in the experiment and received a monetary reward for his participation. Thirty-six healthy right-handed undergraduates, including 18 early and high proficient Catalan-Spanish bilinguals (11 females, mean age = 23.06, standard deviation (SD) = 3.04) and 18 Spanish monolinguals (9 females, mean age = 23.67, SD = 4.28) gave written informed consent to participate in the study. There were no statistically significant between-group differences in age and gender. All participants had normal or corrected-to-normal vision, and were screened by self-report to exclude any subjects reporting previous or current neurological or psychiatric conditions, and current psychotropic medication use.

All participants were subjected to a preliminary interview about their use of languages, and their personal and familiar language history, after which they were assigned to the bilingual or monolingual groups. Age of acquisition was derived from a self-report questionnaire that contained questions about the frequency of use of each language at various ages from early life (1 = only Spanish, 7 = only Catalan). This questionnaire was structured into four main categories and three sub-categories: before primary school, primary school age (at school, home, free time), secondary school age (at school, home, free time), adult age (at work/university, home, free time), and the corresponding questions intended to assess the extent of early and continuous practice in Catalan and Spanish. All the bilingual participants had learned both languages and had sufficient experience with them for the first four years of life: 13 bilinguals learned both languages at home and at school, whereas the 5 remaining bilinguals learned Spanish at home and Catalan at school. All bilinguals reported a continuous use of both languages since they were 4 years old. Despite this early and continuous exposure, some participants showed preferences for one of their languages. We took their preferences to establish the participant's L1 (or dominant) and L2 (or non-dominant) (10 participants preferred Catalan, 3 Spanish, and 5 had no preference for either language).

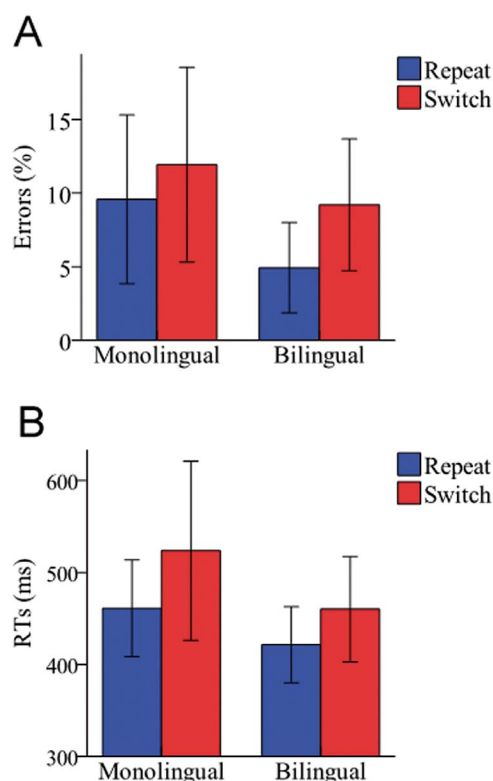
Participants self-rated their language proficiency on a 4-point scale (1 = "very low proficiency," 4 = "very proficient") in four different domains: listening, reading, speaking and writing. Given the very extensive and early experience, all bilingual participants rated 4 ("very proficient") in all these domains in both Spanish and Catalan. It is important to note that these participants received bilingual schooling for at least 13 years. This bilingual schooling does not mean that Catalan or Spanish was taught as a foreign language. Instead, different courses of the syllabus (e.g., maths, social sciences, etc.) were taught in different languages. Thus, all bilinguals had a perfect command of both languages at all levels and self-reported the need for making continuous changes between Spanish and Catalan depending on the interlocutor present. Noteworthy, subjective measures of self-reported language proficiency appear to provide an effective measure of bilingual ability [16] (Marian et al. 2007). This is probably even more so for very homogeneous samples like the one tested in this study. Bilinguals also self-reported an actual active use of both languages throughout their life (mean 59% use of Catalan and 41% use of Spanish), and that they frequently switch between languages depending on environment rules.

The monolingual group was formed by Spanish participants coming from monolingual regions of Spain who had moved to

**Table 1.** Brain activations for bilinguals and monolinguals in the comparison between the switch and repeat trials.

BILINGUALS						
Activated regions	Brodmann Area	Talairach coordinates			T-value	Cluster Size(mm <sup>3</sup> )
		x	y	z		
L, Superior Frontal Gyrus	6	−21	11	52	6.91	8802
L, Middle Frontal Gyrus	6	−18	6	58	6.61	
L, Middle Frontal Gyrus	9	−27	42	34	6.11	2106
L, Middle Frontal Gyrus	9	−24	34	34	5.35	
L, Middle Frontal Gyrus	9	−33	42	26	5.29	
L, Middle Frontal Gyrus	46	−42	44	6	4.26	
L, Medial Frontal Gyrus	6	−12	−23	56	5.98	1998
L, Medial Frontal Gyrus	6	−6	−11	67	3.88	
L, Inferior Frontal Gyrus	46	−50	35	9	5.52	648
L, Precentral Gyrus	6	−42	−1	47	6.65	
L, Precentral Gyrus	6	−15	−17	62	5.92	
L, Inferior Parietal Lobule	40	−45	−48	25	7.82	945
L, Middle Temporal Gyrus	39	−42	−57	22	3.72	
L, Middle Temporal Gyrus	39	−50	−66	23	5.98	621
L, Middle Temporal Gyrus	39	−45	−74	26	4.66	
L, Middle Temporal Gyrus	21	−56	−50	−3	5.47	621
L, Cingulate Gyrus	32	−6	22	40	5.24	
L, Caudate Head		−6	12	5	6.84	
R, Middle Frontal Gyrus	6	18	6	61	6.28	783
R, Precuneus	7	18	−65	36	9.73	39960
R, Precuneus	31	18	−60	22	7.13	
R, Precuneus	7	36	−71	42	6.03	729
R, Middle Occipital Gyrus	19	48	−76	4	6.06	621
R, Middle Occipital Gyrus	19	48	−73	−4	4.17	
R, Anterior Cingulate	32	3	33	23	6.78	4995
R, Cingulate Gyrus	32	15	11	38	5.19	
R, Posterior Cingulate	30	3	−46	19	6.83	
R, Caudate Head		6	9	2	8.14	10962
R, Putamen		12	9	−3	7.29	
MONOLINGUALS						
L, Inferior Frontal Gyrus	47	−24	23	−9	4.49	
L, Paracentral Lobe	31	−3	−30	43	5.02	756
L, Precuneus	31	−27	−71	28	5.31	918
L, Precuneus	7	−9	−71	37	5.22	1215
L, Precuneus	7	−9	−59	53	4.43	
L, Inferior Parietal Lobule	40	−50	−33	40	4.90	999
L, Temporal Lobe	37	−48	−47	−5	5.37	1215
L, Middle Occipital Gyrus	19	−50	−56	−7	5.29	
L, Middle Occipital Gyrus	19	−27	−78	20	5.26	
L, Caudate Head		−6	9	2	7.29	3105
L, Medial Globus Pallidus		−15	−6	3	6.29	
R, Precuneus	7	12	−59	50	4.95	1350
R, Lateral Globus Pallidus		12	3	5	6.10	999
R, Caudate Body		15	1	17	3.87	

Note: One-sample t-test at  $p < 0.05$ , FWE cluster-corrected.  
doi:10.1371/journal.pone.0073028.t001



**Figure 2. Magnitude of switch costs in errors (A) and RTs (B).** Magnitude of switch costs for bilinguals and monolinguals in a percentage of errors (A) and mean RTs in milliseconds (B). Switch costs were analysed by comparing the responses in the first target trial following repeat and switch cues. As expected, the ANOVAs did not reveal any significant difference between bilinguals and monolinguals ( $p > 0.10$ ).  
doi:10.1371/journal.pone.0073028.g002

Castelló or Valencia less than a year before the experiment started and who stated that they had a very low proficiency in Catalan. It is important to remind that in the Comunidad Valenciana Catalan is used by 30% of the population, while Spanish is used by all the population. Moreover, although all the bilingual and monolingual participants had studied English as a second (or third) language at school, none of them showed good proficiency in English according to self-reported questionnaires.

## 2. Task

A non-linguistic switching task devised by Barceló [14] was adapted to the fMRI scanner using an embedded critical trial design [17] based on an intermittently-instructed task-cueing

paradigm (switching task). Visual stimuli consisted in four equiprobable coloured shapes (red and blue circles and squares;  $p = 0.225$  each) that were embedded within two infrequent black shapes that were the events of interest (vertical dollar symbol and horizontal dollar symbol;  $p = 0.05$  each). The inter-stimulus interval (ISI) was set at 1500 ms and each stimulus lasted 500 ms. Each event of interest (i.e. a dollar symbol) was separated by a varying number of coloured shapes (from 6 to 9) with a temporal mean duration of 14.5 seconds ( $SD = 4.04$ ) to adequately observe the hemodynamic response for each event and to ensure that event-related responses did not overlap.

Before the scan session, subjects completed a 5-minute practice session to ensure they understood the instructions. In the experimental session, each subject performed a total of 70 trial sequences distributed into five runs (each run consisted of 14 sequences, 98 volume acquisitions and lasting 4:05 minutes). The speed and accuracy of each behavioural response were registered.

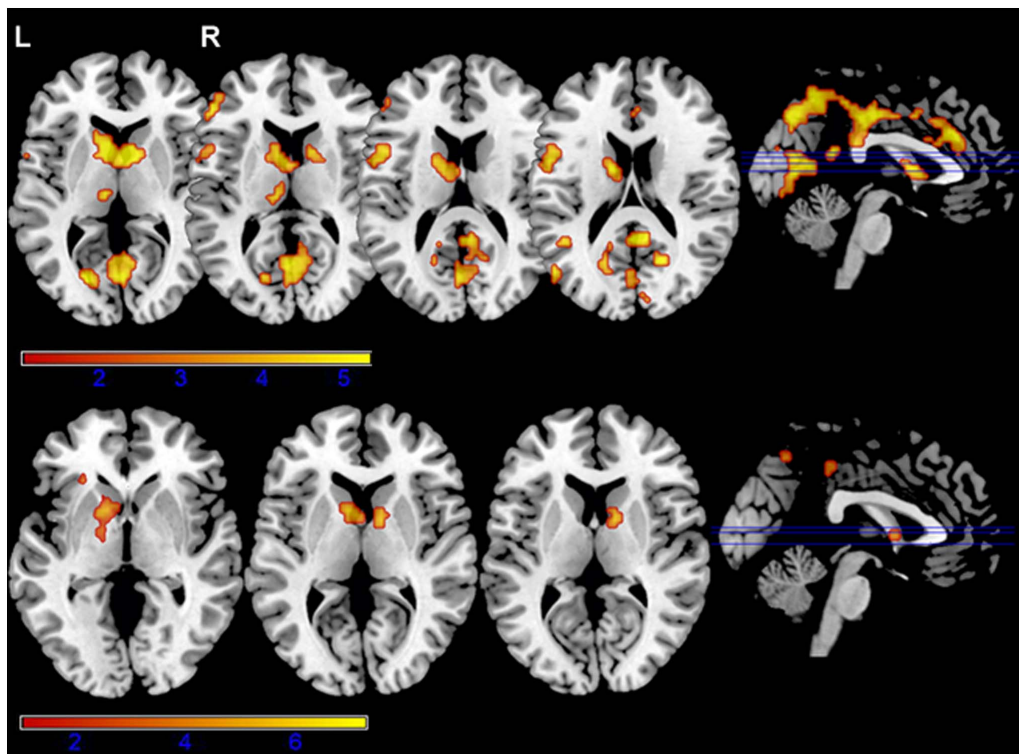
The task consisted in classifying four coloured shapes (red and blue circles and squares; 185 of each kind of shape in the five runs) according to two classification rules (either colour or shape) by pressing a response button with their right index and thumb (370 responses with each finger in the five runs). When sorting by the colour rule, subjects pressed the index button for “red” and the thumb button for “blue”. When sorting by the shape rule, subjects pressed the index button for “circle” and the thumb button for “square”. At the beginning of a run, a written cue was presented to indicate the initial response rule (“COLOR” for colour and “FORMA” for shape). Next, two black symbols (dollar symbol horizontally or vertically) instructed subjects to either “switch” or “repeat” the previous response rule, respectively. So, there were two events of interest: switch and repeat (See Figure 1).

In order to avoid an inaccurate scoring of task-switching errors at rule transition points (after a black symbol), the first and last shapes in a trial sequence always consisted in either a red square or a blue circle. This allowed for an unambiguous assignment of motor responses with the correct or incorrect classification rules. Besides, the manual response was counterbalanced (the same number of manual responses were done with both fingers) for the first and the second response after a black figure, and the same was done for the previous and the following response also in the case that the participant used the incorrect response rule. Moreover, in order to keep perceptual priming effects constant across conditions, the sequential probabilities between each pair of stimuli were controlled. The global probability of two successive repeat cues was the same as that of two successive switch cues. Likewise, the global probability of alternations between switch-repeat cues equalled the probability of repeat-switch alternations. Finally, both black symbols instructed the same number of switch and repeat trials (35 of each in the five runs).

**Table 2.** Region of interest showing increased activation for bilinguals compared with monolinguals.

Region of interest	Talairach coordinates			T-value	Significance
	x	y	z		
L, Inferior Frontal Gyrus	−54	6	21	3.17	$p < 0.05$ , FWE-corrected
L, Anterior Cingulate Cortex	3	18	24	1.15	ns
L, Caudate	−9	9	9	3.41	$p < 0.05$ , FWE-corrected
R, Caudate	6	9	0	1.62	ns

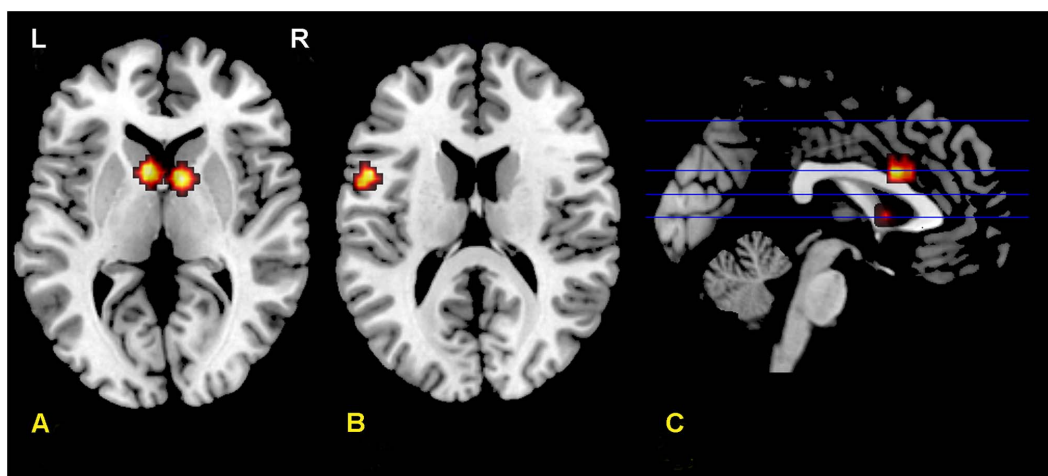
doi:10.1371/journal.pone.0073028.t002



**Figure 3. Brain activations for each group in the comparison between switch and repeat trials.** Brain activations for bilinguals (top) and monolinguals (bottom) in the comparison between the switch and repeat trials (one-sample t-test at  $p < 0.05$ , FWE cluster-corrected). Results for both groups showed the participation of both caudates, and the inferior frontal gyrus.  
doi:10.1371/journal.pone.0073028.g003

The stimulus material in this task was chosen to keep working memory demands and novelty effects at a minimum. In particular, the six perceptual items employed in the task could be easily memorized and discriminated from each other, and they were selected to meet the theoretical limits of human capacity for selecting and holding information in working memory [18]. The task was programmed and presented using the Presentation

software (Neurobehavioral System, Inc., Albany, CA), implemented in Microsoft XP operating system. Visual stimuli were displayed inside the scanner using Visuastim goggles (Resonance Technologies, Inc.), their presentation was synchronized with a scan through a SyncBox (Nordic NeuroLab AS, Bergen, Norway), and responses were registered with a recording device Response-Grip (Nordic NeuroLab AS, Bergen, Norway).



**Figure 4. ROIs used for the two-sample t-test.** Axial and sagittal sections showing the four ROIs used for the two-sample t-test analyses: left and right caudate (A), left inferior frontal gyrus (B) and the ACC (C). These ROIs (spheres of 5 mm radius) were centered on the areas identified in a one sample t-test performed for all the participants (see Table S1 and Figure S1). Results of the two-sample comparison of bilinguals and monolinguals appear on Table 2.  
doi:10.1371/journal.pone.0073028.g004



### 3. Behavioural measures

The percentage of errors was calculated for each task condition and reaction times (RTs) were obtained from correct trials only. The switch cost was computed as the difference in the mean RTs between the first targets following switch and repeat cues [19], [14]. Mean RTs and errors were subjected to repeated measures analyses of variance (ANOVAs) with Trial Type (repeat vs. switch) as the within-subject factor and Group (bilinguals vs. monolinguals) as the between-subjects factor. Only the first target after the cue was included in the analyses as first target trials present maximal effects of switch-specific local costs [19], [14].

### 4. fMRI parameters

All the experimental sessions were performed in a 1.5T scanner (Siemens Avanto, Erlangen, Germany). Participants were placed inside the scanner in the supine position. A sequence BOLD echo planar imaging (BOLD-EPI) of 98 volumes per run was used for fMRI (TE = 50 ms, TR = 2500 ms, FOV = 224×224, matrix = 64×64, voxel size = 3.5×3.5×4, 3.5-mm slice thickness, gap = 0.5-mm, Flip = 90°). We acquired 28 interleaved axial slices parallel to the anterior-posterior commissure (AC-PC) plane covering the entire brain. Prior to the functional MR sequence, an anatomical 3D volume was acquired by using a T1-weighted gradient echo pulse sequence (TE = 4.9 ms, TR = 11 ms, FOV = 24 cm, matrix = 256×224×166, voxel size 1×1×1, 1-mm slice thickness).

### 5. Image analyses

Image processing and statistical analyses were carried out using SPM5 (Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, UK). Each participant's scans were first temporally aligned across the brain volume by slice-timing correction, and then the images were realigned and resliced to the mean image for head motion. Then they were coregistered with the corresponding anatomical (T1-weighted) image, and were normalized (voxels rescaled to 3 mm<sup>3</sup>) with the normalization parameters obtained after anatomical segmentation within a standard stereotactic space (the T1-weighted template from the Montreal Neurological Institute, MNI) to present functional images in the coordinates of a standard stereotactic space. Finally, functional volumes were smoothed using an 8-mm FWHM Gaussian kernel. Image analyses were performed by means of a General Linear Model approach. In the first-level analysis, the five runs were analyzed for each subject by modelling switch events and repeat events separately after convolving each event-related unit impulse with a canonical haemodynamic response function and its first temporal derivative. Realignment parameters were included for each subject as regressors of non interest. A high-pass filter (128 s) was applied to the functional data to eliminate low-frequency components. From this first level, we computed con-images of the parameter estimates to make a comparison between the switch and repeat conditions (switch > repeat) at each voxel for each subject. The resulting images of the parameter estimates were used in the second-level random effect analysis to explore the average effects within groups and the differences between them. At this second level, we performed one sample t-test for each linguistic group (bilinguals and monolinguals). In this analysis, correction for multiple comparisons was done at the cluster level [20]. The results were reported at a  $p < 0.05$  FWE correction at the cluster level (a voxel-level threshold of  $p < 0.001$ ). A two-sample t-test was done to compare between the two linguistic groups (bilinguals and monolinguals). For this analysis, specific regions of interest (ROIs) associated with both cognitive and language control, were studied (see [21]): the right and left inferior frontal gyrus, the right and left

caudate and the ACC. These ROIs (spheres of 5 mm radius) were centered on the areas identified in a one sample t-test performed for all the participants (see Table S1 and Figure S1). The statistical threshold was set at  $p < 0.05$  FWE corrected.

## Results

### 1. Behavioural performance

Mean RTs (bilinguals: 387 ms (SD = 49); monolinguals: 420 ms (SD = 70)) and error rates (bilinguals: 7.6% (SD = 2.9); monolinguals: 10.2% (SD = 6.1)) were not significantly different between the two groups of participants.

Switch costs were analysed by comparing the responses in the first target trial following repeat and switch cues. The main trial effect was significant in both errors ( $F(1, 34) = 9.37, p < 0.05$ ) and RTs ( $F(1, 34) = 16.92, p < 0.001$ ). That is, the target responses following a switch cue elicited longer RTs and higher error rates than the target responses following a repeat cue. It is important to note, however, that the interaction between Trial and Group variables was not significant; ( $F(1, 34) = 0.23, p > 0.10$  for errors; and  $F(1, 34) = .91, p > 0.10$  for RTs); indicating that the magnitude of the switch cost was similar for both groups of participants (see Figure 2).

### 2. Imaging data

**2.1 Within-group activations.** In these analyses, we assessed the differences in brain activation between the switch and repeat trials as an index of switch costs for each group (see Table 1 and Figure 3). In the bilingual group, the comparison made between the switch and repeat trials showed a cluster of activation with a peak in correspondence of the head of the left and right caudates, the left and right cingulate gyri and the left inferior and middle frontal gyri ( $p < 0.05$ , FWE cluster-corrected). In the monolingual group, the same comparison (switch vs. repeat trials) showed that the areas mainly activated were in the basal ganglia (bilateral caudate head and bilateral globus pallidus) and the left inferior frontal gyrus ( $p < 0.05$ , FWE cluster-corrected).

**2.2 Between-groups comparison.** We selected from Table S1 the coordinates for ROIs (see Figure 4). The between-groups comparison using a two-sample t-test revealed that, compared to monolinguals, bilinguals showed increased brain activity in the left caudate (81 mm<sup>3</sup>), and the left inferior frontal gyrus (135 mm<sup>3</sup>) (see Table 2). However, differences were not significant for the ACC, the right inferior frontal gyrus and the right caudate. When we lowered the threshold ( $p > 0.005$  uncorrected), whole brain analysis showed similar results (see Table S2 and Figure S2). The inverse comparison (monolinguals vs. bilinguals) yielded no significant brain differences in the areas of interest.

## Discussion

In the present study, early bilinguals and monolinguals performed a non-linguistic switching task with low-monitoring demands, which involved runs of target trials intermittently interrupted by the presentation of instructional cues. That is, the task cue was not presented in each trial. Arguably, this task involved less monitoring demands than the task-switching paradigms in which each target trial is preceded by a task cue.

Crucially, to minimize the involvement of verbal components, non verbal symbols as cue and manual responses were used; whereas that, main verbal components of the task use the same word in Spanish and Catalan (Shape, Color, switch, repeat...). Importantly, as the contrast of interest compared Switch and



Repeat trials, the possible role of language control, internal verbalizations and L2 inhibition were also controlled.

Participants' performance in this task showed a significant switch cost in terms of RTs and error rates. It is noteworthy, however, that the magnitude of the switch cost was comparable in bilinguals and monolinguals. That is, with this task-switching paradigm, in which monitoring demands are low, the magnitude of the behavioural switch cost did not seem to be affected by bilingualism. However, we observed differences between the groups in brain activities associated with the switch cost, which is precisely the crucial contribution of the present study. Bilinguals displayed greater activation than monolinguals specifically associated with task switching in the left caudate and in the left inferior frontal gyrus. Therefore, the present results are consistent with our previous observations [5] in which early bilinguals used brain areas involved in language control to a larger extent than monolinguals during non-linguistic task switching. The important point here is that this observation was still present even in the absence of statistically significant behavioural differences between the two groups. Thus, neural differences observed in the previous [5] and in the present study suggest that bilinguals use language areas more than monolinguals to perform switching tasks. Whether or not these brain differences between bilinguals and monolinguals leads to behavioural differences in task switching appears to depend on various properties of the specific task-switching implementation. For example, when the task switch requires high cognitive demands and the need of endogenous rapid disengaging from irrelevant inputs ([2], [13], [3], [22]) then it seems to be more likely to find these behavioral differences.

Bilinguals and monolinguals display greater activity in the caudate nucleus bilaterally when processing switch vs. repeat trials. This activity is in accordance with the notion that the caudate nucleus is the main structure involved in shifting between already established task sets, especially when the monitoring and inhibitory demands of the task are low [10]. Indeed, damage to basal ganglia structures leads to difficulties in task-switching paradigms, as shown in Huntington's disease [23] and Parkinson's disease [24]. Yet, on top of this bilateral activity associated with task-switching in both groups, we also observed a difference between the groups. Although both monolinguals and bilinguals recruit the left caudate when switching, bilinguals do so to a greater extent than monolinguals. The origin of such a bilingual effect probably lies in the involvement of the left caudate nucleus in bilingual language control. In other words, although the left caudate appears to be involved in monolingual language processing [25], its involvement in bilingual language control is even more fundamental [26], [27], [28], [29], [30]. For example, damage to this area leads to pathological language switching [31], [32]. Hence given the specific involvement of this area in bilingualism, it is reasonable to expect functional differences also in task switching in accordance with the participants' bilingual status, and this is precisely what we found. Consequently, a likely explanation for this greater left caudate involvement in bilinguals could be its extension from the linguistic function underlying language switching to also encompass the attentional control required to select the correct response set in a non-linguistic task-switching paradigm.

Further evidence for linguistically related areas being more recruited by bilinguals than monolinguals during task switching originates from the pattern of activity observed in the left inferior frontal gyri. This area is activated to a greater extent in switch than in repeat trials both in bilinguals and monolinguals. This observation is congruent with previous neuropsychological studies reporting that damage to this area leads to reduced endogenous control in task switching which, in turn, leads to exaggerated

sensitivity to the exogenous cueing of the task set [10]. Confirming our previous result [5], we found that the left inferior frontal gyrus is more activated in bilinguals than in monolinguals. As for the left caudate, this area is involved in language processing in both monolinguals and bilinguals, and it also plays a key role in bilingual language control [21]. Hence, the fact that bilinguals recruit the left inferior frontal gyrus more than monolinguals suggests that continuous bilingual language control has an effect on the extent to which linguistically dedicated areas are involved in task switching.

There are, however, certain limitations in our study that should be addressed in further studies. First, our sample is formed by early and highly proficient of bilinguals that live in a society with frequent demands of language switching. Future research should determine if our conclusions can be generalized to other kind of bilinguals with different characteristics. Second, the monolingual sample used in this study was formed by undergraduates coming from other parts of Spain. The lack of control of sociodemographic variables should not be discarded a possible bias of the results [33], although previous studies offer strong support for the claim that bilingualism acts independently of variables such as language similarity, cultural background, and language of schooling in influencing nonverbal outcomes [34,35]. Third, even although the task could be carried out without using linguistic representations, we cannot completely rule out that participants engaged in some sort of implicit linguistic behaviour. If so, then brain differences between monolinguals and bilinguals in this experiment may be driven by a different implicit use of these strategies.

Overall, these results suggest that bilinguals and monolinguals recruit largely similar brain areas to perform non-linguistic task-switching. However, there are relevant differences associated with bilingualism. It appears that bilinguals engage to a greater extent than monolinguals the brain areas associated with language control, in switching tasks where language is not involved. This suggests that there is some cross-talk between the brain areas housing language control and those involved in the general-purpose cognitive control system [36]. This is likely to happen as a result of bilinguals' very early experience in managing and controlling two languages. Furthermore, the fact that these brain differences are observed even in the absence of behavioural differences between the two groups suggests that the functional brain dynamics associated with bilingualism do not necessarily lead to more efficient behavioural performance. In other words, we herein describe how bilinguals and monolinguals attain comparable performance levels in a low-monitoring demand task, even though they recruit the same brain areas to a different extent. In fact, we may even argue that the brain control exerted by monolinguals in the present task is even more efficient than for bilinguals. Future studies should determine if this functional reorganization depends on factors such as age of acquisition or the amount of previous experience in language switching [29].

## Supporting Information

**Figure S1 Brain activations for all participants in the comparison between switch and repeat trials (one-sample t-test at  $p < 0.05$ , FWE cluster-corrected).** (TIF)

**Figure S2 Brain activations for bilinguals compared with monolinguals in the comparison between switch and repeat trials (two-sample t-test at  $p < 0.005$  uncorrected).** (TIF)

**Table S1 Brain activations for all participants when comparing between switch and repeat trials.**  
(DOCX)

**Table S2 Region of interest showing increased activation for bilinguals compared with monolinguals.**  
(DOCX)

## References

- Bialystok E, Craik FIM, Klein R, Viswanathan M (2004) Bilingualism, aging, and cognitive control: evidence from the Simon task. *Psychol Aging* 19: 290–303.
- Costa A, Hernández M, Sebastián-Gallés N (2008) Bilingualism aids conflict resolution: evidence from the ANT task. *Cognition* 106: 59–86.
- Hilchey MD, Klein RM (2011) Are there bilingual advantages on nonlinguistic interference tasks? Implications for the plasticity of executive control processes. *Psychon Bull Rev* 18: 625–658.
- Bialystok E, Craik FIM, Grady C, Chau W, Ishii R, et al. (2005) Effect of bilingualism on cognitive control in the Simon task: evidence from MEG. *NeuroImage* 24: 40–49.
- Garbin G, Sanjuan A, Forn C, Bustamante JC, Rodriguez-Pujadas A, et al. (2010) Bridging language and attention: brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. *NeuroImage* 53: 1272–1278.
- Luo L, Luk G, Bialystok E (2010) Effect of language proficiency and executive control on verbal fluency performance in bilinguals. *Cognition* 114: 29–41.
- Abutalebi J, Della RPA, Green DW, Hernández M, Scifo P, et al. (2012) Bilingualism tunes the anterior cingulate cortex for conflict monitoring. *Cereb Cortex* 22: 2076–86.
- Abutalebi J, Green DW (2007) Bilingual language production: The neurocognition of language representation and control. *Journal of Neurolinguistics* 20: 242–275.
- Green DW (1998) Mental control of the bilingual lexico-semantic system. *Bilingualism: Language and Cognition* 2: 67–81.
- Robbins TW (2007) Shifting and stopping: fronto-striatal substrates, neurochemical modulation and clinical implications. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 362: 917–932.
- Stuss DT (2011) Functions of the frontal lobes: relation to executive functions. *J Int Neuropsychol Soc* 17: 759–65.
- Bialystok E (2009) Bilingualism: The good, the bad and the indifferent. *Bilingualism: Language and Cognition* 12: 3–11.
- Costa A, Hernández M, Costa-Faidella J, Sebastián-Gallés N (2009) On the bilingual advantage in conflict processing: now you see it, now you don't. *Cognition* 113: 135–149.
- Barceló F, Periáñez JA, Nyhus E (2008) An Information Theoretical Approach to Task-Switching: Evidence from Cognitive Brain Potentials in Humans. *Front Hum Neurosci* 1: 13.
- Abutalebi J (2008) Neural processing of second language representation and control. *Acta Psychol (Amst)* 128: 466–478.
- Marian V, Shildkrot Y, Blumenfeld HK, Kaushanskaya M, Farooqi-Shah Y, et al. (2007) Cortical activation during word processing in late bilinguals: similarities and differences as revealed by functional magnetic resonance imaging. *J Clin Exp Neuropsychol* 129: 247–265.
- Chein JM, Schneider W (2003) Designing effective fMRI experiments. In *The Handbook of Neuropsychology*, Vol. 9. J. Grafman and I. Robertson, editors. Elsevier Science, Amsterdam.
- Miller G (1956) The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychol Rev* 63: 81–97.
- Monsell S (2003) Task switching. *Trends Cogn Sci* 7: 134–140.
- Friston KJ, Jezzard P, Turner R (1994) Analysis of functional MRI time-series. *Hum Brain Mapp* 1: 153–171.
- Abutalebi J, Green DW (2008) Control mechanisms in bilingual language production: Neural evidence from language switching studies. *Lang Cogn Process* 23: 557–582.
- Mishra RK, Hilchey MD, Singh N, Klein RM (2012) On the time course of exogenous cueing effects in bilinguals: higher proficiency in a second language is associated with more rapid endogenous disengagement. *Q J Exp Psychol* 65: 1502–10.
- Aron AR, Watkins L, Sahakian BJ, Monsell S, Barker RA, et al. (2003) Task-set switching deficits in early-stage Huntington's disease: implications for basal ganglia function. *J Cogn Neurosci* 15: 629–642.
- Cools R, Barker RA, Sahakian BJ, Robbins TW (2001) Enhanced or impaired cognitive function in Parkinson's disease as a function of dopaminergic medication and task demands. *Cereb Cortex* 11: 1136–1143.
- Robles S, Gatignol P, Capelle L, Mitchell M, Duffau H (2005) The role of dominant striatum in language: a study using intraoperative electrical stimulations. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 76: 940–946.
- Crinion J, Turner R, Grogan A, Hanakawa T, Noppeney U, et al. (2006) Language control in the bilingual brain. *Science* 312: 1537–1540.
- Abutalebi J, Brambati SM, Annoni JM, Moro A, Cappa SF, et al. (2007) The neural cost of the auditory perception of language switches: an event-related functional magnetic resonance imaging study in bilinguals. *J Neurosci* 27: 13762–13769.
- Abutalebi J, Annoni JM, Zimine I, Pegna AJ, Seghier ML, et al. (2008) Language control and lexical competition in bilinguals: an event-related fMRI study. *Cereb Cortex* 18: 1496–505.
- Garbin G, Costa A, Sanjuan A, Forn C, Rodriguez-Pujadas A, et al. (2011) Neural bases of language switching in high and early proficient bilinguals. *Brain Lang* 119: 129–35.
- Price C, Green DW, Von Studnitz R (1999) A functional imaging study of translation and language switching. *Brain* 122: 2221–2235.
- Mariën P, Abutalebi J, Engelborghs S, De Deyn PP (2005) Pathophysiology of language switching and mixing in an early bilingual child with subcortical aphasia. *Neurocase* 11: 385–398.
- Abutalebi J, Miozzo A, Cappa S (2000) Do subcortical structures control "language selection" in polyglots? Evidence from pathological language mixing. *Neurocase* 6: 51–56.
- Bialystok E (2001) Bilingualism in development: Language, literacy, and cognition. New York: Cambridge University Press.
- Bialystok E, Viswanathan M (2009) Components of executive control with advantages for bilingual children in two cultures. *Cognition* 112: 494–500.
- Barac R, Bialystok E (2012) Bilingual Effects on Cognitive and Linguistic Development Role of Language, Cultural Background, and Education. *Child Dev* 83: 413–422.
- Moritz-Gasser S, Duffau H (2009) Cognitive processes and neural basis of language switching: proposal of a new model. *Neuroreport* 20: 1577–1580.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: ARP AS FB. Performed the experiments: ARP PR. Analyzed the data: ARP NVC. Contributed reagents/materials/analysis tools: AS CM CA. Wrote the paper: ARP NVC AC CA.

## Supplementary Material

Table S1. Brain activations for all participants when comparing between switch and repeat trials.

Activated regions	Brodmann	Talairach			T-value	Cluster Size (mm³)
	Area	coordinates				
		x	y	z		
L, Superior Frontal Gyrus	10	-30	59	14	5.07	729
L, Medial Frontal Gyrus	6	-21	8	49	6.29	5373
L, Middle Frontal Gyrus	9	-50	16	32	5.63	
L, Middle Frontal Gyrus	6	-30	11	46	5.54	
L, Inferior Frontal Gyrus	47	-24	23	-9	5.18	432
L, Precentral Gyrus	4	-36	-18	48	4.07	405
L, Precentral Gyrus	44	-53	7	13	4.18	351
L, Paracentral Lobule	31	-3	-30	43	6.98	71631
L, Precuneus	7	-6	-71	39	6.87	
L, Inferior Parietal Lobule	40	-50	-33	43	6.69	
L, Superior Temporal Gyrus	22	-50	14	-3	4.61	
L, Superior Temporal Gyrus	22	-59	-40	8	5.61	2808
L, Middle Temporal Gyrus	21	-50	-46	8	5.14	
L, Middle Temporal Gyrus	37	-53	-50	-3	4.82	
L, Middle Temporal Gyrus	39	-45	-69	17	5.31	891
L, Middle Temporal Gyrus	39	-45	-74	26	4.25	
L, Fusiform Gyrus	37	-33	-47	-15	4.17	432
L, Culmen	30	-12	-41	-6	5.26	729
L, Posterior Lobe	37	-33	-56	-15	4.04	

<b>L, Cingulate Gyrus</b>	32	-3	22	40	4.75	
<b>L, Anterior Cingulate</b>	24	0	16	24	6.81	4536
<b>L, Insula</b>	13	-42	12	2	4.74	756
<b>L, Caudate</b>		-6	9	5	8.15	
<b>L, Lateral Globus Pallidus</b>		-12	6	0	7.66	
<b>R, Superior Frontal Gyrus</b>	9	33	45	28	4.28	
<b>R, Middle Frontal Gyrus</b>	10	33	48	20	4.50	972
<b>R, Postcentral Gyrus</b>	20	48	-24	45	4.31	
<b>R, Parietal Lobe</b>	7	27	-47	55	5.37	1107
<b>R, Inferior Parietal Lobule</b>	40	33	-38	54	4.47	
<b>R, Superior Temporal Gyrus</b>	22	53	12	2	5.55	729
<b>R, Fusiform Gyrus</b>	37	45	-56	-15	4.17	
<b>R, Culmen</b>	37	27	-53	-15	5.16	999
<b>R, Cingulate Gyrus</b>	32	3	25	26	5.66	
<b>R, Caudate</b>		9	6	5	8.42	18900

---

Note: One-sample t-test at  $p < 0.05$ , FWE cluster-corrected.

Table S2. Region of interest showing increased activation for bilinguals compared with monolinguals.

<b>BILINGUALS &gt; MONOLINGUALS</b>						
Activated regions	Brodmann areas	Talairach coordinates			T-value	Cluster size (mm <sup>3</sup> )
		x	y	z		
L, Medial Frontal Gyrus	10	-15	47	11	3.53	486
		-21	41	3	3.39	
L, Inferior Frontal Gyrus	44	-53	10	19	3.35	432
L, Caudate		-21	-28	29	4.03	351
L, Caudate		-9	9	11	3.64	432
R, Middle Frontal Gyrus	8	21	25	37	4.02	567
<b>MONOLINGUALS &gt; BILINGUALS</b>						
R, Supramarginal Gyrus	40	62	-42	33	3.87	270

Note: Two-sample t-test at  $p < 0.005$ , uncorrected.

Figure S1. Brain activations for all participants in the comparison between switch and repeat trials (one-sample t-test at  $p < 0.05$ , FWE cluster-corrected).

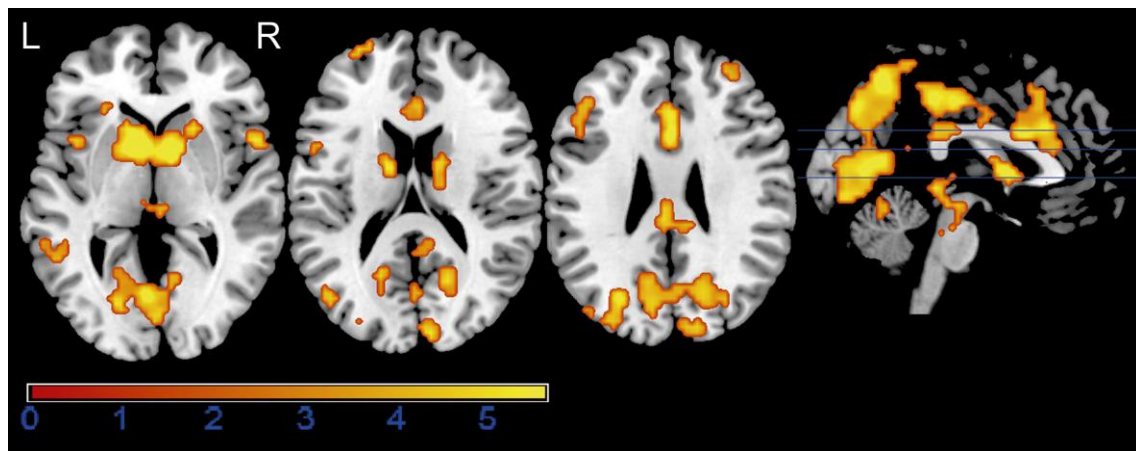
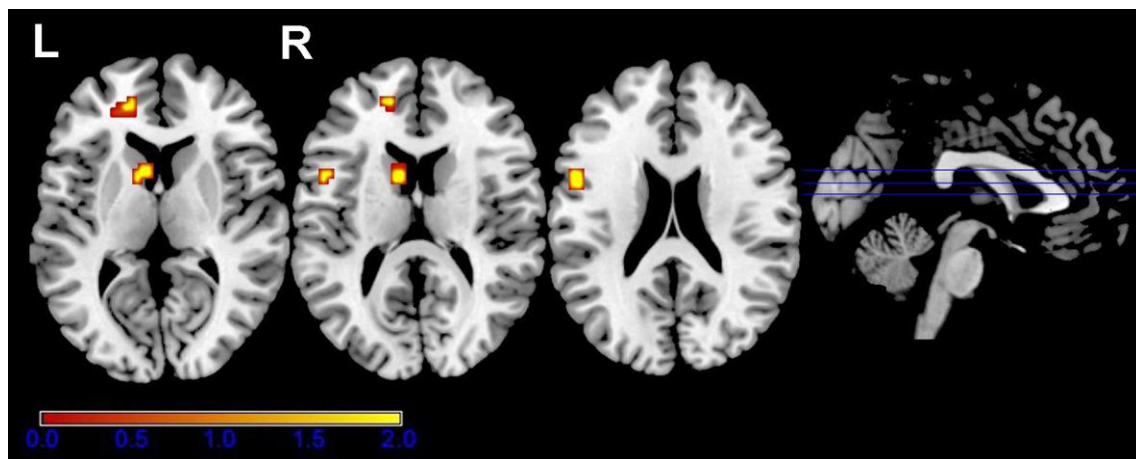


Figure S2. Brain activations for bilinguals compared with monolinguals in the comparison between switch and repeat trials (two-sample t-test at  $p < 0.005$  uncorrected).



**2.7. Rodríguez-Pujadas A, Sanjuán A, Fuentes Paola, et al. (sometido)**  
***Differential neural control in early bilinguals and monolinguals during response inhibition.***





Differential neural control in early bilinguals and monolinguals during response  
inhibition

Aina Rodríguez-Pujadas.<sup>1</sup>, Ana Sanjuán.<sup>1</sup>, Paola Fuentes.<sup>1</sup>, Noelia Ventura-  
Campos.<sup>1</sup>, Alfonso Barrós-Loscertales.<sup>1</sup> and César Ávila.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Psychology, Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, Spain

Address:  
Aina Rodríguez-Pujadas  
Dept. Psicologia  
Campus Riu Sec  
Fac. Ciències Humanes i Socials  
Universitat Jaume I  
E-12071 Castelló  
SPAIN  
E-mail address: pujadas@psb.uji.es  
Telephone number: (+34)964-387664  
<http://www.fmri.uji.es>

Keywords: anterior cingulate cortex, executive control, fMRI, language control

## ABSTRACT

We tested the hypothesis that early bilinguals and monolinguals use different brain areas when performing nonlinguistic executive control tasks. For this, we explored brain activity of early bilinguals and monolinguals during a manual stop-signal paradigm. Behaviorally, bilinguals and monolinguals did not show significant differences in the task, which led us to compare brain activation that cannot be attributed to differences in performance. Analyses demonstrated that monolinguals activated the anterior cingulate cortex more than bilinguals when performing the stop-signal task. These results offer direct support for the notion that early bilingualism exerts an effect on neural circuitry responsible for executive control. Consistent with recent reports, we found that bilinguals used the anterior cingulate more efficiently than monolinguals to monitor nonlinguistic cognitive conflicts.

## 1. INTRODUCTION

In recent years, the effects of being bilingual on nonlinguistic cognitive processes have been broadly studied. For example, early studies showed that bilingual children solved a nonverbal conflict task in a different way than monolingual children (Bialystok and Majumder, 1998), and studies with bilingual adults have shown that bilinguals tend to outperform monolinguals in specific tasks that involve conflict resolution and monitoring, and set shifting (Bialystok et al., 2004; Costa et al., 2008; Hilchey and Klein, 2011). At present, however, much less is known about the impact of bilingualism on brain organization of executive control (EC) functions. The few studies related to this issue suggested that bilingualism affects not only the efficiency of EC functioning but also the brain structures recruited when performing EC tasks (Bialystok et al., 2005; Garbin et al., 2010; Luo et al., 2010; Abutalebi et al., 2012). With the present study, we expected to improve our knowledge about how bilingualism affects the brain networks involved in EC. More concretely, we put to test the hypothesis that there are differences between early or lifelong bilinguals and monolinguals in language areas recruited when performing an EC task.

Research has overwhelmingly shown that when a bilingual person uses one language, the other is active at the same time during both comprehension and production. Despite this coactivation of languages, language control failures that lead to cross-language intrusions are scarce, at least in high-proficient bilinguals, which is evidence that bilinguals develop excellent language control abilities. Abutalebi and Green (2008) conducted a qualitative review on this issue and proposed that the language control mechanism in bilinguals was sustained by a set of brain areas: the anterior cingulate cortex (ACC), left inferior frontal cortex, left caudate and bilateral

supramarginal gyri. This model was confirmed in quantitative meta-analyses examining bilingual language switching (Luk et al., 2012). As a result of the acquisition of two languages during early age and the constant practice, bilingual speakers can continuously and extensively train this brain network involved in language control. It is important to note that this kind of language control may be considered a special case of EC. The mechanisms of EC recruited to resolve competition among linguistic representations may be similar to those recruited when resolving competition among representations in perception and attention (Green, 1998). In fact, the brain areas related to the control of executive processes are the bilateral ACC, inferior and medial frontal cortices and caudate (Robbins, 2007; Stuss, 2011), and include areas linked to language control. With respect to this, it seems reasonable to hypothesize cross-talk between the processes engaged in domain-general EC and those involved in language control. In fact, such cross-talk is at the basis of current explanations of the observed bilingual advantage in EC tasks that minimally involve language such as conflict resolution tasks (Bialystok, 2009).

Recent reviews have served to outline the specific differences between bilinguals and monolinguals in executive processes (Bialystok et al., 2012; Hilchey and Klein, 2011). In these, authors concluded that both groups of speakers did not differ in inhibitory processes, although bilinguals showed advantages in domain-general executive functioning manifested in more efficient processing when performing an interference task. Thus, for bilinguals, language use seems to involve interference suppression more than response inhibition. Bialystok and colleagues (2012) clarified that the affected behavioral processes of response inhibition in bilinguals arise when a univalent stimulus is associated with a prepotent response that must be overruled (e.g. “if the arrow points right, I’ll respond left”), whereas in

interference suppression, the stimulus is bivalent, which means that it contains two cues that are each associated with a different response and attention must be selectively focused on the relevant cue. Also, the nature of the interfering information is not revealed until the display appears. For example, in the Simon task, the participant must respond with the left button if the stimulus is green but cannot prepare to deal with possible competing information until the display is shown.

Taking into account these pieces of evidence, the bilingual advantage seems to be associated with a single EC component. However, our knowledge about the specific way in which bilingual language control alters the brain networks of individuals when performing nonlinguistic EC tasks is rather limited. One appealing possibility is that bilingual language control throughout life may impact organization of the cognitive control network in a qualitative (and not only in a quantitative) way, leading to the involvement of language control brain areas in nonlinguistic tasks that engage interference suppression (Garbin et al., 2010). As a consequence, a qualitative view may imply that bilinguals employ a different brain network from monolinguals to perform nonlinguistic EC tasks. Note, however, that the use of a different network may suggest the existence not only of behavioral differences (Garbin et al., 2010; Costa et al., 2009) but also of neural differences in the absence of behavioral differences (Abutalebi et al., 2012; Luk et al., 2010; Bialystok et al., 2005; Rodríguez-Pujadas et al., submitted).

In the present study, we aimed to further test our original hypothesis regarding the neurofunctional consequences of bilingualism by comparing the neural substrates of performing a response inhibition task, specifically the manual motor stop-signal paradigm (Xue et al., 2008), in a group of early, high-proficient bilinguals and a group

of monolinguals. This task is suitable to find neural differences between bilinguals and monolinguals in the absence of performance differences. Given the early experience of bilinguals in managing two languages, we expected to find differences between bilinguals and monolinguals in brain activation in language control areas (i.e., ACC, left inferior frontal gyrus, left inferior parietal cortex, and left caudate; see Abutalebi, 2008).

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Participants

This study comply the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki) and was approved by Universitat Jaume I's ethics committee. Also, in accordance with the Universitat Jaume I's ethical protocol, each participant handed in a written informed consent to participating in the experiment and received a monetary reward for his participation. Thirty-three healthy undergraduates, including 17 early and high-proficient Catalan-Spanish bilinguals (7 females,  $M_{\text{age}} = 21.41$ ,  $SD = 1.54$ ) and 16 Spanish monolinguals (8 females,  $M_{\text{age}} = 21.00$ ,  $SD = 2.49$ ) participated in the study. There were no statistically significant between-group differences in age and gender ( $p > .05$ ). All participants were right-handed as judged by the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) and had normal or corrected-to-normal visual acuity. Anyone reporting psychiatric or neurological disorders, current psychotropic medication use, or metal parts in the body were excluded from the study.

Participants were assigned to the bilingual or monolingual group based on a preliminary interview about their use of languages, and their personal and family language history. Age of acquisition was obtained from a self-report questionnaire that contained questions about the frequency of use of each language at various stages of life (using a Likert scale ranging from 1 [*only Spanish*] to 7 [*only Catalan*]). This questionnaire was composed of four main categories and three subcategories: before primary school, primary school (at school, at home, in free time), secondary school (at school, at home, in free time), and adulthood (at work or school, at home,

in free time); and the corresponding questions intended to assess the extent of early and continuous use of Catalan and Spanish.

All bilingual participants reported to have learned and actively used both languages during the first 4 years of life: 15 bilinguals learned both languages in kindergarten and at home, and 2 bilinguals learned Catalan in kindergarten and Spanish at home. The mean use of Catalan was 50.88% ( $SD = 21.80$ ; range: 15–80) and of Spanish was 49.12% ( $SD = 21.27$ ; range: 20–85). Also, all bilingual participants received bilingual education for at least 13 years. This means that Catalan or Spanish was not taught as a foreign language; instead, different school subjects (e.g., math, social sciences) were taught in different languages. As a result, all bilinguals had a perfect command of both languages continuously throughout their lives and reported regularly having to switch between Catalan and Spanish depending on the interlocutor. Participants self-rated their language proficiency with a 4-point scale ranging from 1 (*very high proficiency*) to 4 (*very low proficiency*) in four different domains –listening, reading, speaking, and writing– and all bilingual participants self-rated as having very high proficiency in all these domains in both Catalan and Spanish. It is important to note that subjective or self-reported measures of language proficiency seem to provide an effective measure of bilingual ability (Marian et al. 2007). Finally, although bilingual participants had studied English as a third language in school, none of them showed good proficiency in English according to self-reported questionnaires.

On the other hand, the monolingual group comprised Spanish university students from monolingual regions of Spain who had moved to Castelló or Valencia less than a year before the experiment started. Despite the fact that these



participants had learned English as a second language in school, they reported a low frequency of English use and low proficiency in English. It should be noted that Catalan is used by 30% of the population in Valencia while Spanish is used by all of the Spanish population and in the majority of situations.

## 2.2 Task Overview

Participants performed a stop-signal task devised by Xue et al. (2008) and based on the stop-signal paradigm (Logan and Cowan, 1984) in an fMRI scanner. Two types of trials were employed in the task: *Go* trials ( $p = .75$ ) and *Stop* trials ( $p = .25$ ). In *Go* trials, participants responded manually (with the index finger or thumb) and as fast as possible to the visual stimulus presented on the screen. In *Stop* trials, they were instructed to stop their manual response when a stop signal (beep) was sounded at a particular stop-signal delay (SSD) after the presentation of the visual stimulus.

Crucially, the stop-signal task is based on the assumption that the two main processes involved (*Go* and *Stop*) are independent of each other, in agreement with the race model proposed by Logan and Cowan (1984). This model assumes that the processes responding to the stimulus race against the processes responding to the stop signal. The response will be executed if the process responding to the stimulus finishes first, and the response will be inhibited if the process responding to the stop signal finishes first. According to this theory, response inhibition reflects the probability that the stopping process finishes before the stimulus response process.

Importantly, the race model allows the achievement of a certain probability of successful inhibition through manipulation of the SSD: Probability of inhibition is high

when the SSD is short, and probability of inhibition is low when the SSD is long. Thus, the SSD was varied throughout the task to yield an inhibition probability of 50% for each participant. Moreover, the stop-signal reaction time (SSRT), a measure of the speed of the stopping process, was calculated by subtracting the average SSD (central SSD; SSDc) from the median reaction time (RT) of correct Go responses (Xue et al, 2008). In the present study, the SSDc value was estimated through a behavioral test conducted 2 days before the scanner session.

### 2.3 Prescan Behavioral Test

Differences between tests before and during the scanner session were minimal and the basic paradigm for both tests was as follows. Each trial started with a fixation crosshair (500 ms) in the center of a black screen. Afterward, a white letter (T or D, equally probable and randomized) appeared on the screen and remained there until participants manually responded or after a 1-s interval, whichever occurred first. The next trial always began after a 1-s delay. Participants responded by pressing a response button with their right index finger or thumb to indicate which of the two letters had appeared.

A Stop trial was identical to a Go trial except that a tone (500 ms in duration) was played with a variable delay after the stimulus. If the participant inhibited their response, the stimulus remained on the screen for 1 s. Otherwise, if the participant responded, the stimulus disappeared and the next trial started after a 1-s delay.

Four randomized runs (240 Go trials and 80 Stop trials each) were completed in the behavioral task. These runs started with an SSD value (100, 150, 200, and 250 ms) that changed throughout the experiment depending on the participant's

responses. If the participant successfully inhibited a response in a Stop trial, the SSD was increased by 50 ms making inhibition less likely in the subsequent Stop trial; otherwise, if the participant did not successfully inhibit a response, the SSD was decreased by 50 ms to make inhibition more likely. An SSDc was computed for each participant based on the values of the four runs after the participant had reached 50% probability of inhibition. More specifically, the SSDc was obtained by averaging the values for the last 10 moves of each run. An SSDc was calculated for each participant and was then used for the fMRI test.

## 2.4 Scan Task

The paradigm used in the fMRI test, designed by Xue et al. (2008), was very similar to the previously described prescan behavioral test except for 3 differences. First, Matlab code was used to select sequences of Go, Stop, and null events, and to select the distribution of null time in a way that optimized the detection of hemodynamic responses for the critical contrast (Stop vs. Go events). We would like to thank Russ Poldrack for this code. Null events were imposed between every trial (Go or Stop). The duration of null time ranged between 0.5 and 4 s ( $M = 1$  s, sampled from an exponential distribution truncated at 4 s). There were three runs in total with 96 Go trials and 32 Stop trials in each run. Second, the SSD used in the fMRI test was obtained from the SSDc prescan test in the following way. In each block of trials, there were 32 Stop trials with eight SSD values taken from the four different levels: SSDc – 60ms, SSDc – 20ms, SSDc + 20ms, and SSDc + 60ms. Third, the stimuli remained on the screen for 1 s irrespective of the participant's response.

The task was programmed and presented using Presentation software (Neurobehavioral Systems, Albany, CA) running in the Microsoft Windows XP

operating system. Visual stimuli were displayed in the scanner using Visuastim goggles (Resonance Technology, Northridge, CA) and their presentation was synchronized with the scanner using a SyncBox (Nordic NeuroLab, Bergen, Norway). Stop tones were played through headphones at a level comfortable for the participant. Responses were registered with a recording device (ResponseGrip, Nordic Neurolab, Bergen, Norway).

## 2.5 Behavioral Measures

Responses to incorrect Go trials were excluded from the behavioral analyses. For the behavioral version of the task, the SSRT was obtained by subtracting the SSDc (average of the last 10 moves of the four levels) from the mean RT for Go trials. For the fMRI version, an observed SSRT ( $SSRT_{obs}$ ) was estimated according to the race model (as done by Xue et al., 2008): For each SSD, the response rate was computed and then the  $n^{th}$  percentile of RT for Go trials corresponding to the response rate was extracted. For example, if the response rate was 40% for a given SSD, the 40<sup>th</sup> percentile of the RT for Go trials was calculated and the SSD was subtracted from this value. This gave an estimation of SSRT for each of the four different SSDs, which were then averaged to obtain a single estimation of SSRT.

## 2.6 MRI Data Acquisition

All the experimental sessions were performed in a 1.5 T scanner (Siemens Magnetom Avanto, Erlangen, Germany). Participants were placed inside the scanner in the supine position. A BOLD echo-planar imaging sequence (BOLD-EPI) of 191 volumes per run (for a total of three runs) was used for fMRI (TE = 45 ms, TR = 2000 ms, FOV = 224 x 224, matrix = 64 x 64, voxel size = 3.5 x 3.5 mm, slice thickness =

4.5 mm, slice gap = 0.5 mm, flip angle = 90°). For each volume, we acquired 24 interleaved axial slices parallel to the anterior-posterior commissure plane, covering the entire brain. Prior to the functional MR sequence, an anatomical 3D volume was acquired using an MPRAGE sequence (TE = 3.79 ms, TR = 2200 ms, FOV = 256 x 256, matrix = 256 x 256 x 160, voxel size = 1 x 1 x 1 mm).

## 2.7 Image Analyses

Image preprocessing and statistical analyses were carried out using SPM8 (Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, UK). Prior to preprocessing, we applied artifact correction (automatic detection and repair of bad slices) using the ArtRepair toolbox for SPM (Mazaika, Whitfield & Cooper, 2005). Images were temporally aligned across the brain volume by slice-timing correction and then the images were realigned and resliced onto the mean image for head-motion correction. Afterward, the corresponding anatomical (T1-weighted) image was coregistered to the mean EPI (Echo Planar Imaging) image. The functional volumes were normalized (voxels rescaled to 3 mm<sup>3</sup>) using parameters obtained after anatomical segmentation within a standard stereotactic space (the T1-weighted template from the Montreal Neurological Institute). Finally, functional volumes were smoothed using an 8-mm FWHM Gaussian kernel. Image analyses were by general linear model. A high-pass filter (128 s) was applied to the functional data to eliminate low-frequency components. The following events were modeled after convolution with a canonical hemodynamic response function: GoHit, StopInhibit, StopFail (incorrect responses after the stop signal), and GoFail (Go trials without responses or errors), including their temporal derivatives and six motion parameters as covariates of no interest. Null events were not explicitly modeled and as a consequence, they constituted an

implicit baseline. We generated four contrast images for each participant: Go contrast (GoHit > baseline), Stop contrast (StopInhibit > baseline), StopFail contrast (StopFail > baseline), and Stop vs. Go contrast (StopInhibit > GoHit). In a random-effects analysis, we employed a one-sample  $t$  test for each contrast to obtain population inferences for both groups (bilinguals and monolinguals) together. A two-sample  $t$  test for each contrast was done to compare the two linguistic groups. Finally, to explore the relationship between brain activity at the whole-brain level during the stop-signal task (Stop vs. Go contrast) and behavioral responses, we conducted a multiple regression analysis using behavioral scores (RT and SSRT) as regressors of interest. All analyses were thresholded at  $p < .05$ , family-wise error corrected for multiple comparisons at the cluster level determined by whole-brain Monte Carlo simulations using the AlphaSim program in REST software (version 1.8; <http://www.restfmri.net>; voxel-wise threshold of  $p < .005$ ). Results of the one-sample  $t$  test were analyzed with a cluster-size criterion of 145 voxels for the Go contrast, 148 voxels for the Stop contrast, and 133 voxels for the Stop vs. Go contrast. For the two-sample  $t$  test and regression analyses, a cluster-size criterion of 131 voxels was used.

### 3. RESULTS

#### 3.1 Behavioral Performance

At the behavioral level, there were no significant differences between the two groups of participants. The absence of significant differences between groups means that both groups were equally efficient behaviorally. Behavioral measures are summarized in Table I.

## 3.2 Imaging Data

### 3.2.1 *Within-group activation*

These analyses were performed using one-sample  $t$  tests that allowed us to assess brain activation for the whole group in the three different conditions: Go, Stop, and Stop versus Go.

One-sample  $t$ -test analyses for the Go contrast showed significant activation in the putamen (bilateral), left thalamus, left postcentral gyrus, and right middle frontal gyrus. Analyses for the Stop contrast demonstrated significant activation in the putamen (bilateral), left thalamus, right insula and right inferior frontal gyrus. Finally, analyses for the Stop versus Go contrast showed activation in the insula and superior temporal gyrus, bilaterally in both cases (see Figure 1 and Table II).

### 3.2.2 *Between-group comparison*

These analyses were performed using two-sample  $t$  tests that allowed us to compare brain activation of both groups of speakers, bilinguals and monolinguals, in the Go, Stop, and Stop versus Go contrasts. Analyses of neither the Go nor Stop contrasts showed significant differences between groups. Results for the Stop vs. Go contrast demonstrated that the ACC gyrus activated in monolinguals more than bilinguals (see Figure 2 and Table III). The opposite comparison for this condition (bilinguals vs. monolinguals) did not show significant differences. The multiple regression analysis did not show significant results.

#### 4. DISCUSSION

The main aim of the present study was to further advance our knowledge of the neurofunctional consequences of bilingualism through a nonlinguistic stop task that involves motor response inhibition. Our hypothesis was that the online monitoring required in the nonverbal stop task and in language selection would be similar, both involving response inhibition processes (Luk et al., 2010; Byalistok, 2012). Consequently, brain activation differences between early, high proficient bilinguals and monolinguals when performing a nonlinguistic, manual stop-task paradigm were tested. In this task, participants were asked to inhibit a motor response triggered by a go signal when this go signal was unexpectedly followed by a stop signal. A comparison between stop and go trials (Stop vs. Go contrast) allowed us to explore brain activation associated with the suppression of a motor response, presumably linked with response inhibition processes. Crucially, in the absence of any significant behavioral differences between groups, we found that monolinguals activated the ACC in the Stop vs. Go contrast more than bilinguals. Consistent with evidence (see Abutalebi et al., 2012), bilinguals seem to require less ACC activation to perform a nonverbal task of cognitive control at the same behavioral level as monolinguals. Thus, in agreement with our previous studies and our current hypothesis, bilingualism seems to have an important effect on the cognitive control network involved in conflict resolution tasks. Next, we will discuss the most important observations of our study in more detail.

Results of the stop task for both groups showed activation in brain areas typically associated with the stop-task paradigm. For the Go contrast, results demonstrated significant bilateral activation in the putamen, left thalamus, left postcentral gyrus and right middle frontal gyrus. This Go network is consistent with



previous studies on the stop task (Aron and Poldrack, 2006; Xue et al. 2008), with research on motor responding including Go/No-Go studies (Liddle et al., 2001; Mostofsky et al., 2003) and with Mink's (1996) model of voluntary action according to which responses occur via the fronto-striatal-pallidal pathway of the basal ganglia. Left thalamus activation could be related to a postulated hyperdirect discharge before voluntary movement to inhibit all potential responses (Mink, 1996). Also, although this Go network is mainly contralateral, consistent with a right-hand response, bilateral putamen activation has previously been found in similar studies, which explains that whereas simple finger tapping movements activate the contralateral putamen, more complex movement may activate the bilateral putamen (Aron and Poldrack, 2006; Reichenbach et al., 1998; Mattay and Weinberger, 1999).

Analyses for the Stop contrast showed significant activation of the inferior frontal gyrus, right fusiform gyrus, right insula, left thalamus (ventral lateral nucleus), and bilateral putamen. Functional neuroimaging studies investigating the cortical processes of response inhibition identified the right inferior frontal gyrus as one of the key brain regions mediating motor response inhibition (Aron and Poldrack, 2004; Li et al., 2006; Rubia et al., 2003, 2007). This region likely operates as a part of a distributed network also involving the subthalamic nucleus, presupplementary motor area, ACC, insula, thalamus, putamen, and caudate (Aron and Poldrack., 2006; Li et al., 2006; Rubia et al., 2003, 2007). Thus, our results are partially in agreement with this proposal since we found activation in the inferior frontal gyrus, insula, thalamus and putamen. Our results are also in agreement with previous studies that reported a critical role of the inferior frontal gyrus in inhibiting prepotent responses during the stop-task paradigm (Aron et al., 2003a, 2004; Chambers et al., 2006; Picton et al., 2007; Verbruggen and Logan, 2008) and attentional switching (Dove et al., 2000;

Cools et al., 2002), the process by which the focus of attention is moved from one locus to another (Monsell, 2003). In this respect, the inhibitory control hypothesis (Cools et al., 2002) suggests that the right inferior frontal gyrus facilitates the attentional switch by inhibiting the previously attended object, location or dimension, thereby allowing attention to shift away (Hampshire et al., 2010; Cools et al., 2002). Other studies have proposed that this structure may respond whenever salient cues that have a bearing on the current task plan are detected (Hampshire et al., 2009), such as when counting cues, initiating responses and inhibiting responses. Furthermore, bilateral activation in the left thalamus (specifically the ventral lateral nucleus) may agree with the model of Aron and Poldrack (2006), which proposes that interactions between the right inferior frontal gyrus and subthalamic nucleus are critical for response inhibition. Activity in the right insula and right fusiform gyrus is also typically associated with performance monitoring and error detection (Fauth-Bühler et al., 2012).

Importantly, comparison analyses between bilinguals and monolinguals during response inhibition in this nonverbal stop task (as explained, the successful inhibition of a manual response in the Stop vs. Go contrast) showed that monolinguals activated the ACC more than bilinguals. It is noteworthy that the reverse comparison (bilinguals vs. monolinguals) yielded no significant functional differences. Neither comparison between both groups in the Go nor Stop contrasts demonstrated significant activation. Another important point is that the significant activation found was still present even in the absence of statistically significant behavioral differences between groups. This allowed us to compare neural activation between these two groups without the possibility of attributing it to differences in behavioral performance, hence permitting cleaner attribution of such brain modulation to the bilingual status of

the participant. This evidence is completely in agreement with a recent study of Abutalebi et al. (2012) who proposed that this brain area is a key structure used more efficiently by bilinguals than monolinguals to monitor nonlinguistic cognitive conflicts similar to those in this study. Furthermore, this observation is consistent with the notion that bilinguals require fewer neural resources in the ACC to monitor cognitive conflict, and with the data of Luk et al. (2010) suggesting that bilingualism selectively affects the neural network involved in resolving nonverbal conflict or interference.

The role of the ACC has been broadly tied to monitoring of conflicts in information (Carter et al., 1999; Botvinick et al., 2004) and action outcomes, and guides decision making (Cole et al., 2010). Mainly, Cole and colleagues (2010) have proposed that the ACC monitors a conflict that acts as a teaching signal driving a form of inhibitory learning. In the bilingual context, this mechanism may be employed to monitor the occurrence of conflicts and select among competing sentential representations (Novick et al., 2005; Thompson-Schill et al., 2005; Ye and Zhou, 2008). Furthermore, the ACC is proposed to be responsible for detecting conflicts among incompatible response tendencies (Ye and Zhou, 2009), and ACC activation was found for both language switching and nonverbal switching (Abutalebi et al., 2008, 2012). The fact that monolinguals activated the ACC more than bilinguals implies, at the functional level, that bilinguals use this brain area less and more efficiently than monolinguals to monitor nonlinguistic cognitive conflicts that involve processes of response inhibition. This evidence suggests that continuous bilingual language control has an effect on the extent to which linguistically dedicated areas are involved in the manual stop task.

The results of the present study showing more activity in the ACC in monolinguals than bilinguals contrast with our previous results showing more activity in the left inferior frontal cortex during task switching in bilinguals than monolinguals (Garbin et al., 2010; Rodríguez-Pujadas et al., submitted). From our point of view, this difference reinforces the existence of qualitatively different networks of EC. Previous studies note an important link between the ACC and prefrontal cortex in monitoring response conflict. It has been proposed that the ACC has a specific role in detecting conflict, serving as a signal that recruits the prefrontal cortex to resolve such conflict, minimizing subsequent conflict and improving performance (Kerns, 2004; Carter and Van Veen, 2007). Furthermore, Posner and Petersen (1990) emphasized that higher metabolic activation in the prefrontal cortex may be accompanied by reduced activation in the ACC when participants perform tasks that require stopping all other activity while waiting for low probability signals, in order to prevent interference with detecting the external signal. In fact, a recent study showed that the ACC has a great impact on reducing noise in dorsolateral prefrontal areas during challenging cognitive tasks that involve avoiding conflict (Medalla and Barbas, 2009). As a result, we hypothesized that bilinguals would use the left lateral prefrontal cortex more than monolinguals, and monolinguals would use the ACC more than bilinguals to solve EC tasks.

Finally, to isolate the neural correlates specific to the stop process, we contrasted the Stop and Go conditions (Stop vs. Go) for all participants. In accordance with our previous results, the analysis showed bilateral brain activation in the superior temporal gyrus (auditory cortex, due to the audible stop signal) and right inferior frontal gyrus/anterior insula (Xue et al., 2008; Aron and Poldrack, 2006; Fauth-Bühler et al., 2012; Rubia et al., 2007). As explained, activation in the insula

may be linked to processes of monitoring and error detection (Fauth-Bühler et al., 2012). In fact, both the superior temporal gyrus and insula are part of the typical stop network (Aron and Poldrack, 2006), which is confirmed in our study. Crucially, as mentioned, the main result of this study relies on the comparison between bilinguals and monolinguals for this contrast, demonstrating more efficient use of the ACC by bilinguals than monolinguals to monitor conflicting nonverbal information. This result is in accordance with previous results concluding that the bilingual advantage reflects a more efficient monitoring system for conflict resolution (Costa et al., 2009) and more relevantly, that bilingualism selectively affects the neural networks involved when encountering conflicting information. Due to this phenomenon, mechanisms to resolve competition among representations in language would be similar to those recruited to resolve competition among representations in perception and attention (Abutalebi and Green, 2007; Bialystok, 2001).

Acknowledgements: This research has been supported by the Brainglot project of the CONSOLIDER-INGENIO 2010 Programme (CSD2007-00012). The project has also been supported by grants PSI2010-20168 and PSI2012-33054 from MINECO, and P1-1B2011-09 from the Universitat Jaume I. ARP and PF have a FPU grant from the Spanish Government,

## 5. REFERENCES

Abutalebi J, Annoni JM, Seghier M, Zimine I, Lee-Jahnke H, Lazeyras F, Cappa SF, Khateb A (2008): Language control and lexical competition in bilinguals: an event-related fMRI study. *Cereb Cortex* 18:1496-1505.

Abutalebi J, Della Rosa PA, Green DW, Hernandez M, Scifo P, Keim R, Cappa SF, Costa A (2012): Bilingualism Tunes the Anterior Cingulate Cortex for Conflict Monitoring. *Cereb Cortex* 22:2076-86.

Aron AR, Fletcher PC, Bullmore ET, Sahakian BJ, Robbins TW (2003a): Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans. *Nat Neurosci* 6:115-116.

Abutalebi J, Green DW (2007): Bilingual language production: The neurocognition of language representation and control. *J Neurolinguist* 20:242-275.

Abutalebi J, Green DW (2008): Control mechanisms in bilingual language production: Neural evidence from language switching studies. *Lang Cognitive proc* 23:557-582.

Aron AR, Poldrack RA (2006): Cortical and subcortical contributions to Stop signal response inhibition: role of the subthalamic nucleus. *J Neurosci* 26:2424-2433.

Aron AR, Robbins TW, Poldrack RA (2004): Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends Cogn Sci* 8:170-177.

Bialystok E. 2001. *Bilingualism in Development: Language, Literacy, and Cognition*. Cambridge University Press, New York.

Bialystok E (2009): Bilingualism: The good, the bad, and the indifferent. *Biling. Lang Cogn* 12:3-11.

Bialystok E, Craik FIM, Grady C, Chau W, Ishii R, Gunji A, Pantev C (2005): Effect of bilingualism on cognitive control in the Simon task: evidence from MEG. *NeuroImage* 24:40-49.

Bialystok E, Craik FIM, Klein R, Viswanathan M (2004): Bilingualism, aging, and cognitive control: evidence from the Simon task. *Psychol Aging* 19:290-303.

Bialystok E, Craik FIM, Luk G (2012): Bilingualism: consequences for mind and brain. *Trends Cogn Sci* 16:240-50.

Bialystok E, Majumder S (1998): The relationship between bilingualism and the development of cognitive processes in problem-solving. *Appl Psycholinguist* 19:69-85.

Botvinick MM, Cohen JD, Carter CS (2004): Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends Cogn Sci* 8:539-546.

Carter CS, Botvinick MM, Cohen JD (1999): The contribution of the anterior cingulate cortex to executive processes in cognition. *Rev Neurosci* 10:49-57.

Carter CS, Van Veen V (2007): Anterior cingulate cortex and conflict detection: an update of theory and data. *Cogn Affect Behav Ne* 7:367-79.

Chambers CD, Bellgrove MA, Stokes MG, Henderson TR, Garavan H, Robertson IH, Morris AP, Mattingley JB (2006): Executive 'brake failure' following deactivation of human frontal lobe. *J Cogn Neurosci* 18:444-55.



Cole M, Yeung N, Freiwald W, Botvinick M (2010): Interpreting anterior cingulate function across species: A reply to Schall and Emeric. *Brain Behav Evolut.*

Cools R, Clark L, Owen AM, Robbins TW (2002): Defining the neural mechanisms of probabilistic reversal learning using event-related functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci* 22:4563-4567.

Costa A, Hernández M, Sebastián-Gallés N (2008): Bilingualism aids conflict resolution: evidence from the ANT task. *Cognition* 106:59-86.

Costa A, Hernández M, Costa-Faidella J, Sebastián-Gallés N (2009): On the bilingual advantage in conflict processing: now you see it, now you don't. *Cognition* 113:135-149.

Dove A, Pollmann S, Schubert T, Wiggins CJ, Von Cramon DY (2000): Prefrontal cortex activation in task switching: An event-related fMRI study. *Brain Research. Cognitive Brain Res* 9:103-109.

Fauth-Bühler M, De Rover M, Rubia K, Garavan H, Abbott S, Clark L, Vollstädt-Klein S, Karl Mann., Schumann G (2012): Brain networks subserving fixed versus performance-adjusted delay stop trials in a stop signal task. *Behavioural Brain Res*: 1:89-97.

Garbin G, Sanjuan A, Forn C, Bustamante JC, Rodríguez-Pujadas A, Belloch V, Hernandez M, Costa A, Ávila C (2010): Bridging language and attention: brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. *NeuroImage* 53:1272-1278.

Green DW (1998): Mental control of the bilingual lexico-semantic system. *Biling Lang Cogn* 1:67-81.

Hampshire A, Chamberlain SR, Monti MM, Duncan J, Owen AM (2010): The role of the right inferior frontal gyrus: inhibition and attentional control. *NeuroImage* 50: 1313-1319.

Hampshire A, Thompson R, Duncan J, Owen AM (2009): Selective tuning of the right inferior frontal gyrus during target detection. *Cogn Affect Behav Neurosci* 9:103-112.

Hilchey MD, Klein RM (2011): Are there bilingual advantages on nonlinguistic interference tasks? Implications for the plasticity of executive control processes. *Psychon B Rev* 18, 625-658.

Kerns JG, Cohen JD, MacDonald AW, Cho RY, Stenger VA, Carter CS (2004): Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science* 303:1023-1026

Li CS, Huang C, Constable RT, Sinha R (2006): Imaging response inhibition in a stop-signal task: neural correlates independent of signal monitoring and post-response processing. *J Neurosci* 26:186-92.

Liddle PF, Kiehl KA, Smith AM (2001): Event-related fMRI study of response inhibition. *Hum Brain Mapp* 12:100-109.

Logan GD, Cowan WB, Davis KA (1984): On the ability to inhibit simple and choice reaction time responses: a model and a method. *J exp Psychol Hum* 10:276-291.

Luk G, Anderson JA, Craik FI, Grady C, Bialystok E (2010): Distinct neural correlates for two types of inhibition in bilinguals: response inhibition versus interference suppression. *Brain Cogn* 74:347-357.

Luk G, Green DW, Abutalebi J, Grady C (2012): Cognitive control of language switching in bilinguals: A quantitative meta-analysis on functional neuroimaging studies. *Lang Cognitive Proc* 27:1479-1488.

Luo L, Luk G, Bialystok E (2010): Effect of language proficiency and executive control on verbal fluency performance in bilinguals. *Cognition* 114:29-41.

Marian V, Shildkrot Y, Blumenfeld HK, Kaushanskaya M, Faroqi-Shah Y, Hirsch J (2007): Cortical activation during word processing in late bilinguals: similarities and differences as revealed by functional magnetic resonance imaging. *J Clin Exp Neuropsychol* 29:247-265.

Mattay VS, Weinberger DR (1999): Organization of the human motor system as studied by functional magnetic resonance imaging. *Eur J Radiol* 30:105-114.

Medalla M, Barbas H (2009): Synapses with inhibitory neurons differentiate anterior cingulate from dorsolateral prefrontal pathways associated with cognitive control. *Neuron* 61:609-20.

Mink JW (1996): The basal ganglia: focused selection and inhibition of competing motor programs. *Prog Neurobiol* 50:381-425.

Monsell S (2003): Task switching. *Trends Cogn Sci* 7:134-140.

Mostofsky SH, Schafer JG, Abrams MT, Goldberg MC, Flower AA, Boyce A, Courtney SM, Calhoun VD, Kraut MA, Denckla MB, Pekar JJ (2003): fMRI evidence that the neural basis of response inhibition is task-dependent. *Brain Res Cogn Brain Res* 17:419-430.

Novick JM, Trueswell JC, Thompson-Schill SL (2005): Executive control and parsing: reexamining the role of Broca's area in sentence comprehension. *Cog Affect Behav Ne* 5:263-281.

Picton TW, Stuss DT, Alexander MP, Shallice T, Binns MA, Gillingham S (2007): Effects of focal frontal lesions on response inhibition. *Cereb Cortex* 17:826-838.

Posner MI, Petersen SE (1990): The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci* 13:25-42.

Thompson-Schill SL, Bedney M, Goldberg RF (2005): The frontal lobes and the regulation of mental activity. *Curr Opin Neurobiol* 15:219-224.

Reichenbach JR, Feiwell R, Kuppusamy K, Bahn M, Haacke EM (1998): Functional magnetic resonance imaging of the basal ganglia and cerebellum using a simple motor paradigm. *Magn Reson Imaging* 16:281-287.

Robbins TW (2007): Shifting and stopping: fronto-striatal substrates, neurochemical modulation and clinical implications. *Phil Trans R Soc B* 1481:917-932.

Rubia K, Smith AB, Brammer MJ, Taylor E (2003): Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *Neuroimage* 20:351-8.

Rubia K, Smith AB, Taylor E, Brammer M (2007): Linear age-correlated functional development of right inferior fronto-striato-cerebellar networks during response inhibition and anterior cingulate during error-related processes. *Hum brain mapp* 28: 1163-77.

Stuss DT (2011): Functions of the frontal lobes: relation to executive functions. *J Int Neuropsych Soc* 17:759-65.

Verbruggen F, Logan GD (2008): Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends Cogn Sci* 12:418-424.

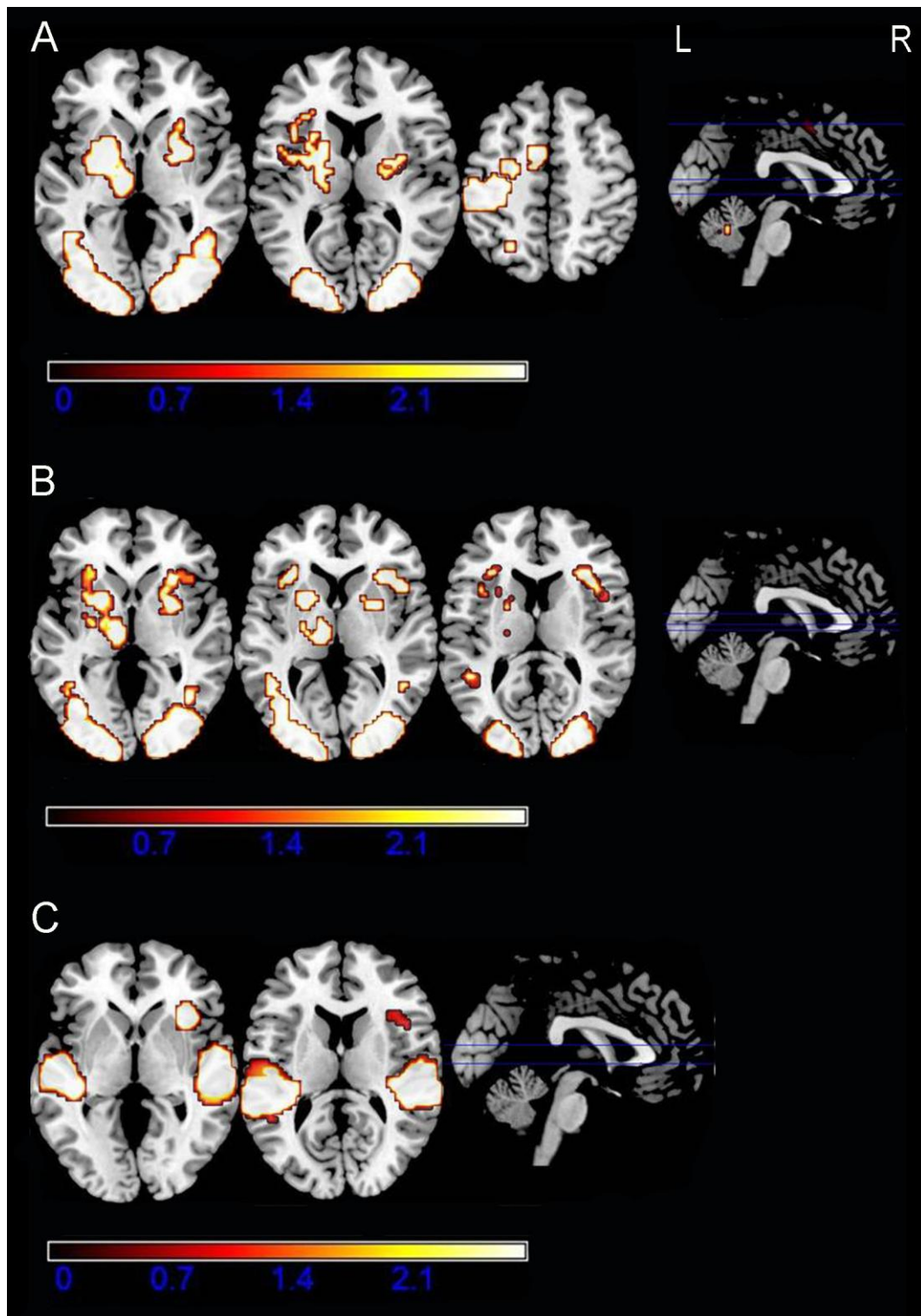
Xue G, Aron AR, Poldrack RA (2008): Common neural substrates for inhibition of spoken and manual responses. *Cereb. Cortex* 18:1923-1932.

Ye Z, Zhou X (2008): Involvement of cognitive control in sentence comprehension: evidence from ERPs. *Brain Res* 1203:103-115.

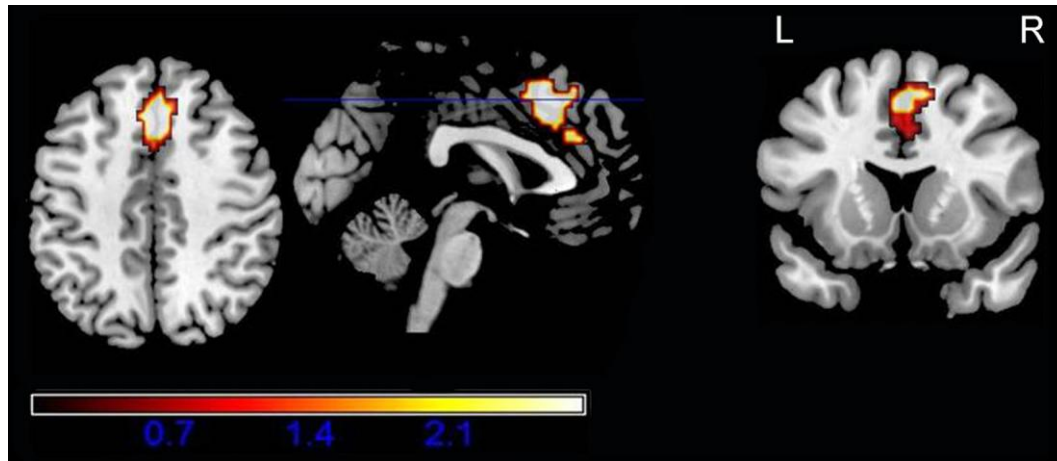
Ye Z, Zhou X (2009): Executive control in language processing. *Neurosci Biobehav Rev* 33:1168-77.

## FIGURE LEGENDS

*Figure 1.* Brain activation using one-sample  $t$  tests for the Go (A), Stop (B), and Stop versus Go (C) contrasts, corrected for multiple comparisons (Monte Carlo simulations, family-wise error threshold of  $p < .05$ ).



*Figure 2.* Brain areas more activated in monolinguals than bilinguals for the Stop versus Go contrast, corrected for multiple comparisons (Monte Carlo simulations, family-wise error threshold of  $p < .05$ ).





*Table 1.* Behavioral measures (means) for each group in the scanner session.

	<b>Bilinguals</b>	<b>Monolinguals</b>	<b><i>t</i> value</b>	<b>Significant differences</b>
	<b><i>M</i> (<i>SD</i>)</b>	<b><i>M</i> (<i>SD</i>)</b>		
<b>Observed SSRT</b>	198.39 (94.06)	182.91 (38.98)	$t(31) = -0.131$	<i>ns</i>
<b>SSRT</b>	221.25 (58.83)	217.86 (87.82)	$t(31) = -0.131$	<i>ns</i>
<b>RT of correct Go trials</b>	685.64 (65.56)	623.52 (120.45)	$t(31) = 1.855$	<i>ns</i>
<b>Percentage of correct Go trials</b>	95.36 (4.92)	95.39 (3.78)	$t(24) = -0.001$	<i>ns</i>
<b>Percentage of correct Stop trials</b>	64.03 (14.94)	62.95 (21.47)	$t(24) = -0.663$	<i>ns</i>
<b>SSDc</b>	464.39 (90.76)	405.66 (143.96)	$t(31) = -1.411$	<i>ns</i>

*Note.* SSRT = stop-signal reaction time; RT = reaction time; SSDc = central stop-signal delay.

*Table II.* Brain activation using one-sample t tests for the Go, Stop and Stop versus Go contrasts.

GO						
Activated regions	BA	Talairach			T-value	Cluster Size (mm³)
		coordinates				
		x	y	z		
L, Middle Occipital Gyrus	18	-24	-88	-8	18.32	1590
L, Inferior Occipital Gyrus	19	-42	-82	-2	12.08	
L, Middle Occipital Gyrus	18	-36	-91	-8	12.05	
R, Middle Occipital Gyrus	18	27	-85	-5	15.76	1984
R, Lingual Gyrus	17	21	-94	-2	15.21	
R, Inferior Occipital Gyrus	18	33	-85	-11	14.11	
L, Thalamus		-12	-22	4	8.17	1447
L, Putamen		-27	-7	-5	7.10	
L, Postcentral Gyrus	2	-36	-28	40	7.00	
R, Putamen		27	5	19	6.67	274
R, Putamen		24	2	1	6.55	
R, Middle Frontal Gyrus		30	14	28	5.24	
STOP						
L, Inferior Occipital Gyrus	18	-24	-88	-8	14.78	1033
L, Middle Occipital Gyurs	18	-21	-94	10	9.11	
L, Middle Occipital Gyrus	18	-42	-79	-2	8.02	
R, Middle Occipital Gyrus	18	27	-85	-5	12.53	1060
R, Lingual Gyrus	17	21	-94	-2	11.36	
R, Fusiform Gyrus	19	33	-64	-11	8.34	

<b>L, Thalamus</b>		-12	-13	1	6.25	259
<b>L, Putamen</b>		-21	8	7	5.27	
<b>L, Thalamus</b>		-12	-19	-8	4.98	
<b>R, Inferior Frontal Gyrus</b>	13	36	23	7	5.78	167
<b>R, Insula</b>	13	45	11	7	5.46	
<b>R, Putamen</b>		27	2	1	4.73	
<b>STOP versus GO</b>						
<b>L, Superior Temporal Gyrus</b>	22	-63	-25	4	9.67	713
<b>R, Superior Temporal Gyrus</b>	41	54	-28	7	9.28	
<b>R, Superior Temporal Gyrus</b>	22	54	-13	1	7.00	
<b>L, Superior Temporal Gyrus</b>	41	-39	-28	7	8.18	806
<b>L, Insula</b>	13	-45	-19	7	8.01	
<b>L, Superior Temporal Gyrus</b>	22	-54	-25	4	7.87	
<b>R, Insula</b>	13	36	20	1	6.55	138

*Note:* Corrected for multiple comparison (Monte Carlo simulations, family-wise error threshold of  $p < .05$ ).

R = right hemisphere, L = left hemisphere, BA = Brodmann Area

*Table III.* Brain activation using two-sample t tests for the Stop versus Go contrast.

Activated regions	BA	Talairach			T-value	Cluster Size (mm³)
		coordinates				
		x	y	z		
R, Cingulate Gyrus	32	3	23	43	3.91	175
R, Superior Frontal Gyrus	8	9	17	52	3.49	
L, Medial Frontal Gyrus	8	0	35	46	3.14	

*Note:* Corrected for multiple comparison (Monte Carlo simulations, family-wise error threshold of  $p < .05$ ).

### **CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN GENERAL**

El principal objetivo de esta tesis era avanzar en el conocimiento de los efectos colaterales del bilingüismo en las funciones ejecutivas de control cognitivo no lingüístico. La hipótesis de partida establecía un mayor solapamiento, funcional y anatómico, entre procesos generales de control cognitivo y otros específicos de control del lenguaje en el bilingüe. Para verificar dicha hipótesis, se compararon bilingües tempranos y proficientes con monolingües cuando realizaban tareas de control cognitivo no lingüístico [a nivel conductual (en TR y tasa de errores) y cerebral (con fMRI)] en tres estudios basados en tareas diferentes: una basada en el paradigma de cambio de set con alta demanda de recursos, otra también de cambio de set pero con baja demanda de recursos atencionales, y finalmente una tarea de señal de *stop*. En todas las tareas se utilizaron estímulos no lingüísticos para evitar la potencial interacción con la experiencia lingüística de los participantes. Los resultados de los tres estudios, desde el punto de vista cerebral, evidencian diferencias entre las activaciones cerebrales en bilingües tempranos, proficientes y monolingües, cuando llevaban a cabo procesos de control cognitivo no lingüístico. De forma relevante, en la mayoría de los casos dichas diferencias cerebrales no están asociadas con diferencias conductuales, lo que evidencia que la diferente organización cerebral no se asocia en todos los casos a beneficios conductuales.

En primer lugar, los resultados del Estudio 1 evidenciaron efectos del bilingüismo en el procesamiento de la alternancia no lingüística (con la implicación mecanismos de control reactivos y elevada demanda de recursos atencionales), manifestado en forma de diferencias en los patrones de *switch cost* cerebrales y conductuales de bilingües tempranos y proficientes y monolingües.

A nivel conductual, únicamente los monolingües mostraron un *switch cost* significativo (en TR y tasa de aciertos), no existiendo diferencias entre ensayos de cambio y continuación del criterio en los bilingües. Esto evidenció la existencia de diferencias conductuales en el procesamiento del cambio, siendo más eficaces los bilingües.

A nivel cerebral, las activaciones asociadas al *switch cost* fueron cualitativamente distintas para ambos grupos de hablantes, evidencia de la existencia de diferencias entre bilingües y monolingües en las redes cerebrales implicadas en la alternancia entre tareas. En la alternancia (ensayos de cambio vs. continuación del criterio) los monolingües activaron el giro frontal inferior derecho, el córtex cingulado anterior y el córtex parietal inferior izquierdo. Todas las áreas evidenciadas han sido previamente relacionadas con procesos inhibitorios y de control cognitivo en tareas de alternancia no lingüística (Botvinick y cols., 2004; Hedden y Gabrieli, 2010; Robbins, 2007, Xue y cols., 2008). En la misma condición, los bilingües activaron, únicamente, el giro frontal inferior izquierdo. Considerando que a esta área se le atribuyen funciones de supresión de respuestas incorrectas en tareas de alternancia, su mayor participación en los bilingües podría deberse a una mayor habilidad para establecer el set de respuesta adecuado, que facilitaría la actuación en tareas

con conflicto (Bialystok y Martin, 2004; Bialystok y Viswanathan, 2009; Carlson y Meltzoff, 2008; Costa y cols., 2008, 2009). Asimismo, la magnitud del *switch cost* en los bilingües correlacionaba negativamente con la activación del giro frontal inferior izquierdo y del estriado izquierdo. La correlación del estriado izquierdo con la reducción del *switch cost*, confirmaría la participación de esta estructura en la eficiente planificación y ejecución del cambio de set.

A modo de conclusión, los resultados evidenciaron que ambos grupos de hablantes utilizaban áreas cerebrales distintas para llevar a cabo procesos de alternancia cognitiva mediante una estrategia reactiva. Teniendo en cuenta el importante papel del giro frontal inferior izquierdo en el control del lenguaje en los bilingües (Abutalebi y Green, 2008), su mayor activación en estos hablantes durante la alternancia no lingüística, apoyaría la existencia de cierto solapamiento entre las áreas cerebrales implicadas en el control del lenguaje y las de control cognitivo general. Además, se hipotetiza que los bilingües podrían tener un desarrollo especial del estriado izquierdo, debido al importante papel del caudado izquierdo en la detección de cambios de lengua.

En segundo lugar, los hallazgos del Estudio 2, siguiendo la línea de los expuestos, extenderían los efectos colaterales del bilingüismo al procesamiento de la alternancia no lingüística con mecanismos de control cognitivo proactivos en una tarea con baja demanda de recursos atencionales. Sin embargo, en este caso los efectos del bilingüismo se evidenciaron únicamente a nivel cerebral.

A nivel conductual se evidenció el efecto *switch cost*, sin embargo éste no se veía afectado por el bilingüismo. Probablemente esto es debido a que el

paradigma experimental utilizado implicaba bajas demandas de monitoreo del conflicto (Costa y cols., 2009). A nivel cerebral, bilingües y monolingües activaron áreas diferentes para el procesamiento de la alternancia. Los monolingües activaron bilateralmente los ganglios basales (cabeza del caudado y globo pálido) y el giro frontal inferior izquierdo, ambas áreas relacionadas con la alternancia entre sets de respuesta (Robbins, 2007). Los bilingües mostraron activaciones en el giro frontal medial e inferior izquierdo y bilaterales en el giro cingulado anterior y la cabeza del caudado. De acuerdo con la literatura previa y el estudio anterior, el giro frontal inferior izquierdo participaría en la supresión de las respuestas incorrectas (Bialystok y Martin, 2004; Carlson y Meltzoff, 2008; Costa y cols., 2008, 2009); el cingulado anterior, en los procesos inhibitorios del control de la alternancia (Abutalebi y cols., 2008, 2012) y el caudado, en la alternancia entre sets de respuesta (Robbins, 2007).

El análisis de las diferencias en las activaciones entre bilingües y monolingües durante el procesamiento de la alternancia reveló que los bilingües activaban más que los monolingües el caudado izquierdo y el giro frontal inferior izquierdo. Ambas áreas han sido previamente relacionadas con el paradigma de alternancia. El caudado izquierdo con la alternancia entre sets de respuesta preestablecidos (Robbins, 2007) y el giro frontal izquierdo, con funciones de supresión de respuestas incorrectas (Bialystok y Martin, 2004; Carlson y Meltzoff, 2008; Costa y cols., 2008, 2009). De modo que, considerando las hipótesis previas, la mayor activación de estas áreas en los bilingües se trataría de un efecto colateral del bilingüismo, que llevaría a un uso distinto de áreas de control del lenguaje en bilingües en tareas de alternancia no lingüística.



De este modo, el estudio evidenció la existencia de diferencias, entre bilingües y monolingües, en las áreas cerebrales activadas en tareas de alternancia no lingüística. Además, las áreas más activadas en bilingües formarían parte de la red de control del lenguaje propuesta por Abutalebi y Green (2008). Así, la mayor implicación del caudado izquierdo (relacionado con la inhibición de la lengua no deseada) y del giro frontal inferior izquierdo (que ejercería funciones de selección e inhibición del lenguaje) en los bilingües, indicaría que la experiencia temprana en el manejo de dos lenguas llevaría a una mayor implicación de áreas cerebrales de control del lenguaje en tareas de alternancia no lingüística.

En tercer y último lugar, el Estudio 3 también ofrece evidencias directas del efecto ejercido por el bilingüismo en las bases cerebrales de control cognitivo. A nivel conductual, no se hallaron diferencias entre bilingües monolingües en TR y la tasa de errores en ninguna de las variables de la tarea. Las activaciones propias de la tarea para la muestra completa de participantes sigue la línea de la literatura previa. Las activaciones de la condición Go, que se localizaban en el putamen, tálamo izquierdo, giro postcentral izquierdo y giro frontal medial derecho, encajarían con el circuito fronto-estriado-palidal propuesto por Mink (1996) y con resultados de estudios previos (Aron y Poldrack, 2006; Xue y cols., 2008). En la condición *stop* se activó el giro frontal inferior, el giro fusiforme derecho, la ínsula derecha, el tálamo izquierdo y el putamen. El giro frontal inferior derecho facilitaría el cambio mediante la inhibición del estímulo previamente atendido (Hampshire y cols., 2010; Cools y cols., 2002) y la activación del tálamo se explicaría por el modelo de Aron y Poldrack (2006), que subraya la interacción entre el giro frontal inferior derecho

y esta área, en la respuesta de inhibición. La activación de la ínsula y el giro fusiforme, estaría asociada con el monitoreo y la detección del error (Fauth-Bühler y cols., 2012).

En el análisis de las diferencias entre grupos, a nivel cerebral evidenció que cuando los monolingües realizaban procesos de inhibición de respuesta, activaban más que los bilingües el córtex cingulado anterior. El papel del cingulado anterior ha sido ampliamente asociado con el monitoreo del conflicto (Botvinick y cols., 2004), el inicio de respuestas y la toma de decisiones (Cole y cols., 2010), participando en la selección entre las distintas representaciones (Novick y cols., 2005; Ye y Zhou, 2009). Además, también se ha asociado con la alternancia entre tareas, tanto de lenguaje como no lingüísticas (Abutalebi y cols., 2008, 2012). Estos resultados indicarían que los bilingües necesitan activar en menor medida el cingulado anterior para realizar una tarea de control cognitivo no verbal con la misma eficacia que los monolingües, evidenciando efectos colaterales del bilingüismo en áreas cerebrales de control del lenguaje bilingüe.

En resumen, la mayor activación del córtex cingulado anterior en los monolingües, indicaría que existen diferencias en las áreas cerebrales activadas por bilingües y monolingües cuando realizan una tarea de control ejecutivo no lingüístico. Lo que, de acuerdo con las hipótesis previas, evidenciaría el efecto del bilingüismo en la red de control cognitivo implicada en tareas de resolución del conflicto.

Para finalizar, la primera de las conclusiones es que los tres estudios realizados apoyan la existencia de diferencias cerebrales entre bilingües y

monolingües cuando ejecutan tareas de control cognitivo no relacionado con el lenguaje. En segundo lugar, las evidencias halladas brindan apoyo a la Hipótesis 3, dado que las diferencias cerebrales encontradas no van asociadas a desventajas conductuales en el procesamiento cognitivo, sino, simplemente al empleo de distintas áreas cerebrales para el mismo (teniendo en cuenta que únicamente en el Estudio 1 los bilingües eran más eficaces conductualmente que los monolingües). En tercer lugar, considerando que las diferencias cerebrales entre bilingües y monolingües para este tipo de tareas se hallan en estructuras que forman parte de la supuesta red de control del lenguaje (Abutalebi y Green, 2007), se ofrece apoyo a la existencia de cierto solapamiento entre áreas de control de lenguaje y de control cognitivo general, de acuerdo con la Hipótesis 1. Finalmente, teniendo en cuenta que los resultados del Estudio 1 y 2 evidencian un mayor uso en los bilingües de áreas implicadas en la red de control del lenguaje, también se verifica la Hipótesis 2.

En el Estudio 1, los bilingües activaron más que los monolingües el giro frontal inferior izquierdo durante la alternancia; en la misma condición, en el Estudio 2, los bilingües activaron el giro frontal inferior izquierdo y el caudado izquierdo más que los monolingües; y en el Estudio 3, los monolingües activaron el córtex cingulado anterior más que los bilingües durante la inhibición de la respuesta. Como ya se ha comentado, el córtex prefrontal lateral izquierdo ejerce un importante rol en las funciones cognitivas generales y en los bilingües, también participaría en la red de control del lenguaje, realizando funciones de selección e inhibición del lenguaje (Abutalebi y Green, 2008). Los ganglios basales del hemisferio izquierdo se encargan de integrar la información de múltiples áreas cerebrales para el aprendizaje motor de la

forma; y en el caso de los bilingües, de establecer el programa motor del lenguaje adecuado, con funciones de planificación, selección y alternancia entre lenguas (Abutalebi y cols., 2000; Aglioti y Fabbro, 1993). De modo que en el Estudio 1 y 2 los bilingües evidencian una mayor activación que los monolingües en áreas de control cognitivo que ejercen un importante rol de control del lenguaje en el bilingüe. Sin embargo, en el Estudio 3 los monolingües activaron más que los bilingües el córtex cingulado anterior. La implicación del córtex cingulado anterior en la monitorización de las respuestas al conflicto ha sido evidenciada de manera muy consistente en la literatura experimental (Carter y cols., 1998, 1999; Botvinick y cols., 2001). En consonancia con dicho papel, distintas investigaciones han relacionado la activación del córtex cingulado anterior con la del córtex prefrontal dorsolateral (área cerebral íntimamente relacionada con el control cognitivo), que llevaría a una mayor eficacia en resolución del conflicto (Kerns, 2004; Carter and Van Veen, 2007). A este respecto, Posner y Petersen (1990) también destacaron que la activación del córtex prefrontal podía ir acompañada de una disminución en la activación del córtex cingulado anterior, cuando se realizaban tareas cognitivas que implicaban el cese de cualquier otra actividad mientras se atendía a la aparición de una señal de baja frecuencia, con la finalidad de prevenir la interferencia de las señales externas.

De este modo, teniendo en cuenta los resultados de los estudios que integran esta tesis así como la íntima asociación entre el córtex prefrontal lateral y el córtex cingulado anterior en situaciones de resolución del conflicto y de control cognitivo, podría hipotetizarse un uso preferencial del córtex prefrontal lateral izquierdo y los ganglios basales en los bilingües, en

contraposición con un mayor uso del córtex cingulado anterior en los monolingües cuando realizan este tipo operaciones mentales. En este sentido, la estrecha relación entre el control cognitivo y el control del lenguaje en los bilingües, podría llevar a un uso más intenso de áreas relacionadas con el lenguaje (concretamente, del área de Broca, en el giro frontal inferior izquierdo, y del caudado izquierdo) y a uno menos intenso de aquellas consideradas como propias de la tarea (córtex cingulado anterior), que no se evidenciaría en el caso de los monolingües. Por lo tanto, estos resultados apoyarían la hipótesis de que el procesamiento continuo y a lo largo de toda la vida del lenguaje en el bilingüe ejerce efectos colaterales en el sistema general de control cognitivo, que tendería al uso preferencial de áreas del lenguaje para la realización de funciones de control cognitivo no relacionadas con el lenguaje.

### 3.1. Conclusiones y Aportaciones Originales

Finalmente, del desarrollo de los estudios que integran esta tesis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1) Los hablantes bilingües y monolingües activan áreas cerebrales distintas cuando llevan a cabo procesos de control cognitivo no lingüístico.
- 2) En la mayoría de los casos, dichas diferencias cerebrales no implican diferencias a nivel conductual, lo que permite concluir que la diferente organización cerebral no siempre va asociada con ventajas conductuales.
- 3) Desde una perspectiva global, los resultados evidencian que para realizar tareas de control cognitivo no relacionadas con el lenguaje, los bilingües activan en mayor grado áreas de control del lenguaje (giro

frontal inferior izquierdo y caudado izquierdo), mientras que los monolingües evidencian un mayor uso de áreas de procesamiento cognitivo y resolución del conflicto (córtex cingulado anterior).

- 4) Los resultados apoyan la hipótesis de que el procesamiento temprano y continuo de dos del lenguas en bilingües ejerce efectos colaterales en el sistema general de control cognitivo, que tiende a un mayor uso de áreas del lenguaje para llevar a cabo funciones de control cognitivo.

## **CAPÍTULO 4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

1. Estudiar la influencia que ejercen determinadas variables sobre el sistema de control cognitivo, como por ejemplo la edad de adquisición (diferenciando entre bilingües tempranos y tardíos) o el tipo de bilingüismo (considerando a bilingües, trilingües y multilingües).
2. Realizar estudios de conectividad funcional con el objetivo de estudiar el peso relativo y la conectividad entre las distintas áreas cerebrales que se han visto implicadas en este tipo de tareas. En este sentido, los bilingües utilizan el giro frontal inferior izquierdo y el caudado izquierdo para responder a este tipo de tareas, mientras que los monolingües activan en mayor medida el córtex cingulado anterior y el giro frontal derecho. Por lo tanto, resulta fundamental realizar un estudio más detallado del patrón de conectividad entre ellas

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aarts E, Roelofs A, Franke B, Rijpkema M, Fernández G, Helmich RC, Cools R (2010): Striatal dopamine mediates the interface between motivational and cognitive control in humans: evidence from genetic imaging. *Neuropsychopharmacol*, 35(9):1943-51.

Abutalebi J, Annoni JM, Seghier M, Zimine I, Lee-Jahnke H, Lazeyras F, Cappa SF, Khateb A (2008): Language control and lexical competition in bilinguals: an event-related fMRI study. *Cereb Cortex*, 18(7):1496-1505.

Abutalebi J, Della Rosa PA, Green DW, Hernandez M, Scifo P, Keim R, Cappa SF, Costa A (2012): Bilingualism Tunes the Anterior Cingulate Cortex for Conflict Monitoring. *Cereb Cortex*, 22(9):2076-86.

Abutalebi J, Green DW (2007): Bilingual language production: The neurocognition of language representation and control. *J Neurolinguist*, 20:242-275.

Abutalebi J, Green DW (2008): Control mechanisms in bilingual language production: Neural evidence from language switching studies. *Lang Cognitive Proc*, 23(4):557-582.

Abutalebi J, Miozzo A, Cappa S (2000): Do subcortical structures control "language selection" in polyglots? Evidence from pathological language mixing. *Neurocase*, 6(1): England.

Adler MK (1977): *Collective and individual bilingualism: a sociolinguist study*. 1 Aufl Hamburg: Buske.

Aglioti S, Fabbro F (1993): Paradoxical selective recovery in a bilingual aphasic following subcortical lesions. *NeuroReport*, 4(12):1359-1362.



Aron AR, Poldrack RA (2006): Cortical and subcortical contributions to Stop signal response inhibition: role of the subthalamic nucleus. *J Neurosci*, 26(9):2424-2433.

Aron AR, Robbins TW, Poldrack RA (2004): Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends Cogn Sci*, 8(4):170-177.

Aron AR, Watkins L, Sahakian BJ, Monsell S, Barker RA et al. (2003): Task-set switching deficits in early-stage Huntington's disease: implications for basal ganglia function. *J Cogn Neurosci*, 15(5):629-642.

Bialystok E (1999): Cognitive Complexity and Attentional Control in the Bilingual Mind. *Child Dev*, 70(3):636-644.

Bialystok E (2001): *Bilingualism in Development: Language, Literacy, and Cognition*. CUP: New York.

Bialystok E (2006): Effect of bilingualism and computer video game experience on the Simon task. *Can J Exp Psychol*, 60(1):68-79.

Bialystok E, Craik FIM, Grady C, Chau W, Ishii R, Gunji A, Pantev C (2005): Effect of bilingualism on cognitive control in the Simon task: evidence from MEG. *NeuroImage*, 24(1):40-49.

Bialystok E, Craik FIM, Klein R, Viswanathan M (2004): Bilingualism, aging, and cognitive control: evidence from the Simon task. *Psychol Aging*, 19(2):290-303.

Bialystok E, Craik F, Luk G (2008): Cognitive control and lexical access in younger and older bilinguals. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 34(4):859-73.

Bialystok E, Craik FIM, Ryan J (2006): Executive control in a modified anti-saccade task: Effects of aging and bilingualism. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 32(6):1341-1354.

Bialystok E, Martin MM (2004): Attention and inhibition in bilingual children: Evidence from the dimensional change card sort task. *Dev Sci*, 7(3):325-339.

Bialystok E, Senman L (2004): Executive processes in appearance-reality tasks: The role of inhibition of attention and symbolic representation. *Child Dev*, 75(2):562-579.

Bialystok E, Shapero, D (2005): Ambiguous benefits: The effect of bilingualism on reversing ambiguous figures. *Dev Sci*, 8(6):595-604.

Bialystok E, Viswanathan M (2009): Components of executive control with advantages for bilingual children in two cultures. *Cognition*, 112(3):494-500.

Botvinick MM, Cohen JD, Carter CS (2004): Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: An update. *Trends Cogn Sci*, 8(12):539-546.

Botvinick MM, Braver TS, Barch DM, Carter CS, Cohen JD (2001): Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol Rev*, 108(3):624-52.

Braver TS (2012): The variable nature of cognitive control: a dual-mechanisms framework. *Trends Cogn Sci*, 16(2):106-113.

Brass M, Ruge H, Meiran N, Rubin O, Koch I, Zysset S, Prinz W, von Cramon DY (2003): When the same response has different meanings: recoding the response meaning in the lateral prefrontal cortex. *Neuroimage*, 20(2):1026-31.

Bunge SA, Dudukovic NM, Thomason ME, Vaidya CJ, Gabrieli JDE (2002): Immature frontal lobe contributors to cognitive control in children: evidence from fMRI. *Neuron*, 33(2):301-311.

Carlson SM, Meltzoff AN (2008): Bilingual experience and executive functioning in young children. *Dev Sci*, 11(2):282-98.

Carter CS, Braver TS, Barch DM, Botvinick MM, Noll D, Cohen JD (1998): Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280(5364):747-9.

Carter CS, Botvinick MM, Cohen JD (1999): The contribution of the anterior cingulate cortex to executive processes in cognition. *Rev Neurosci*, 10(1):49-57.

Carter CS, Van Veen V (2007): Anterior cingulate cortex and conflict detection: an update of theory and data. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 7(4):367-79.

Castellanos FX, Giedd JN, Marsh WL, Hamburger SD, Vaituzis AC, Dickstein DP, Sarfatti SE, Vauss YC, Snell JW, Lange N, Kaysen D, Krain AL, Ritchie GF, Rajapakse JC, Rapoport JL (1996): Quantitative brain magnetic resonance imaging in attention-deficit hyperactivity disorder. *Arch Gen Psychiatry*, 53(7):607-16.

Chevrier AD, Noseworthy MD, Schachar R (2007): Dissociation of response inhibition and performance monitoring in the stop signal task using event-related fMRI. *Hum Brain Mapp*, 28(12):1347-58.

Cools R, Clark L, Owen AM, Robbins TW (2002): Defining the neural mechanisms of probabilistic reversal learning using event-related functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, 22(11):4563-4567.

Cools R, Clark L, Robbins TW (2004): Differential responses in human striatum and prefrontal cortex to changes in object and rule relevance. *J Neurosci*, 24(5):1129-1135.

Cole MW, Yeung N, Freiwald WA, Botvinick M (2010): Conflict over cingulate cortex: Between-species differences in cingulate may support enhanced cognitive flexibility in humans. *Brain Behav Evol*, 75(4):239-40.

Colzato LS, Bajo MT, Van den Wildenberg W, Paolieri D, Nieuwenhuis S, La Heij W, Hommel B (2008): How does bilingualism improve executive control? A comparison of active and reactive inhibition mechanisms. *J Exp Psychol Learn, Mem Cogn*, 34(2):302-12.

Costa A, Hernández M, Sebastián-Gallés N (2008): Bilingualism aids conflict resolution: evidence from the ANT task. *Cognition*, 106(1):59-86.

Costa A, Hernández M, Costa-Faidella J, Sebastián-Gallés N (2009): On the bilingual advantage in conflict processing: now you see it, now you don't. *Cognition*, 113(2):135-149.

Costa A, Santesteban M (2004): Lexical access in bilingual speech production: Evidence from language switching in highly proficient bilinguals and L2 learners. *J Mem Lan*, 50(4):491-511.

Costa A, Santesteban M, Ivanova I (2006): How do highly proficient bilinguals control their lexicalization process? Inhibitory and language-specific selection mechanisms are both functional. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 32(5):1057-1074.

Costa A, Miozzo M, Caramazza A (1999): Lexical selection in bilinguals: Do words in the bilingual's two lexicons compete for selection? *J Mem Lan*, 41(3):365-397.

Cummins RO (1981): Learning to write: can book help? *J Med Educ*, 56(2):128-32.

Dove A, Pollmann S, Schubert T, Wiggins CJ, von Cramon DY (2000): Prefrontal cortex activation in task switching: An event-related fMRI study. *Brain Res Cogn Brain Res*, 9(1):103-109.

Dreher JC, Berman KF (2002): Fractionating the neural substrate of cognitive control processes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 99(22):14595-14600.

Duncan J, Owen AM (2000): Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends Neurosci*, 23(10):475-483.

Dujardin K, Degreef JF, Rogelet P, Defebvre L, Destee A (1999): Impairment of the supervisory attentional system in early untreated patients with Parkinson's disease. *J Neurol*, 246(9):783-8.

Everitt BJ, Robbins TW (1992): Amygdala-ventral striatal interactions and reward-related processes. Aggleton John P (Ed), *The amygdala: Neurobiological aspects of emotion, memory, and mental dysfunction*: New York.

Fan J, McCandliss BD, Sommer T, Raz A, Posner MI (2002): Testing the efficiency and independence of attentional networks. *J Cogn Neurosci*, 14(3):340-347.

Fauth-Bühler M, De Rover M, Rubia K, Garavan H, Abbott S, Clark L, Vollstädt-Klein S, Mann K, Schumann G, Robbins TW (2012): Brain networks subserving fixed versus performance-adjusted delay stop trials in a stop signal task. *Behav Brain Res*, 235(1):89-97.

Finkbeiner M, Almeida J, Janssen N, Caramazza A (2006): Lexical selection in bilingual speech production does not involve language suppression. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 32(5):1075-1089.

Fox MD, Snyder AZ, Vincent JL, Corbetta M, Van Essen DC, Raichle ME (2005): The human brain is intrinsically organized into dynamic, anti-correlated functional networks. *Proc Natl Acad Sci USA*, 102(27):9673-9678.

Fuster JM (1980): *The Prefrontal Cortex: Anatomy, Physiology, and Neuropsychology of the Frontal Lobe*. Raven Press: New York

Garavan H, Ross TJ, Stein EA (1999): Right hemispheric dominance of inhibitory control: An event-related functional MRI study. *Proc Natl Acad Sci USA*, 96(14):8301-8306.

Garavan H, Ross TJ, Murphy K, Roche RA, Stein EA (2002): Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior: inhibition, error detection, and correction. *NeuroImage*, 17(4):1820-1829.

Gehring WJ, Knight RT (2000): Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nat Neurosci*, 3(5):516-520.

Goldman-Rakic PS (1987): Development of cortical circuitry and cognitive function. *Child Dev*, 58(3):601-622.

Hakuta K (1986): *Mirror of Language: The Debate on Bilingualism*, Basic Books: New York.

Hakuta K, Garcia EE (1989): Bilingualism and education. *Am Psychol*, 44:374-379.

Hedden T, Gabrieli JD (2010): Shared and selective neural correlates of inhibition, facilitation, and shifting processes during executive control. *Neuroimage*, 51(1):421-431.

Hilchey MD, Klein RM (2011): Are there bilingual advantages on nonlinguistic interference tasks? Implications for the plasticity of executive control processes. *Psychon Bull Rev*, 18(4):625-658.

Ivanova I, Costa A (2008): Does bilingualism hamper lexical access in speech production. *Acta Psychol (Amst)*, 127(2):277-288.

Iversen SD, Mishkin M (1970): Perseverative interference in monkeys following selective lesions of the inferior prefrontal convexity. *Exp Brain Res*, 11(4):376-386.

Juncos-Rabadán O, Iglesias FJ (1994): Decline in the elderly's language: Evidence from cross-linguistic data. *Journal of Neurolinguistics*, 8(3):183-190.

Kavé G, Eyal N, Shorek A, Cohen-Mansfield J (2008): Multilingualism and cognitive state in the oldest old. *Psychol Aging*, 23(1):70-78.

Kenner NM, Mumford JA, Hommer RE, Skup M, Leibenluft E, Poldrack RA (2010): Inhibitory motor control in response stopping and response switching. *J Neurosci*, 30(5):8512-8.

Kerns JG, Cohen JD, MacDonald AW III, Cho RY, Stenger VA, Carter CS (2004): Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 303(5660):1023-1026.

Kim KHS, Relkin NR, Lee KM, Hirsch J (1997): Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature* 388(6638):171-174.

Konishi S, Donaldson DI, Buckner RL (2001): Transient activation during block transition. *Neuroimage*, 13(2):364-74.

Konishi S, Nakajima K, Uchida I, Kameyama M, Nakahara K, Sekihara K, Miyashita Y (1998): Transient activation of inferior prefrontal cortex during cognitive set shifting. *Nat Neurosci*, 1(1):80-84.

Kovacs AM (2009): Early bilingualism enhances mechanisms of false-belief reasoning. *Dev Sci*, 12(1):48-54.

Kroll JF, Bobb SC, Misra MM, Guo T (2008): Language selection in bilingual speech: Evidence for inhibitory processes. *Acta Psychol (Amst)*, 128(3):416-430.

Lawrence AD, Weeks RA, Brooks DJ, Andrews TC, Watkins LH, Harding AE, Robbins TW, Sahakian BJ (1998): The relationship between striatal dopamine receptor binding and cognitive performance in Huntington's disease. *Brain*, 121(7):1343-55.

Logan GD (1985): On the ability to inhibit simple thoughts and actions: II. Stop-signal studies of repetition priming. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 11(4):675-691.

Logan GD (1994): Spatial attention and the apprehension of spatial relations. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 20(5):1015-1036.

Luria AR (1973): *The Working Brain*. Basic Books: New York.

Garavan H, Ross TJ, Stein EA (1999): Right hemispheric dominance of inhibitory control: an event-related functional MRI study. *Proc Natl Acad Sci USA*, 96(14):8301-8306.

Garbin G, Sanjuan A, Forn C, Bustamante JC, Rodríguez-Pujadas A, Belloch V, Hernandez M, Costa A, Ávila C (2010): Bridging language and attention: Brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. *Neuroimage*, 53(4):1272-8.

Gollan TH, Acenas LA (2004): What is a TOT? Cognate and translation effects on tip-of-the-tongue states in Spanish-English and Tagalog- English bilinguals. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 30(1):246-269.

Gollan TH, Montoya RI, Werner GA (2002): Semantic and letter fluency in Spanish-English bilinguals. *Neuropsychology*, 16(4):562-576.

Gollan TH, Montoya RI, Bonanni MP (2005): Proper names get stuck on bilingual and monolingual speakers' tip of the tongue equally often. *Neuropsychology*, 19(3):278-287.

Gollan TH, Montoya RI, Cera CM, Sandoval TC (2008): More use almost always means a smaller frequency effect: aging, bilingualism, and the weaker links hypothesis. *J Mem Lang*, 58(3):787-814.

Green DW (1986): Control, activation, and resource: a framework and a model for the control of speech in bilinguals. *Brain and Language*, 27(2):210-223.

Green DW (1998): Mental control of the bilingual lexico-semantic system. *Biling Lang Cogn*, 1:67-81.

Hampshire A, Chamberlain SR, Monti MM, Duncan J, Owen AM (2010): The role of the right inferior frontal gyrus: inhibition and attentional control. *NeuroImage*, 50(3):1313-1319.

MacDonald AW, Cohen JD, Stenger VA, Carter CS (2000): Dissociating the Role of the Dorsolateral Prefrontal and Anterior Cingulate Cortex in Cognitive Control. *Science*, 288(5472):1835-1838

Maltby N, Tolin DF, Worhunsky P, O'Keefe TM, Kiehl KA (2005): Dysfunctional action monitoring hyperactivates frontal- striatal circuits in obsessive-compulsive disorder: An event- related fMRI study. *NeuroImage*, 24(2):495-503.

Mariën P, Abutalebi J, Engelborghs S, De Deyn PP (2005): Pathophysiology of language switching and mixing in an early bilingual child with subcortical aphasia. *Neurocase*, 11(6):385-398.

Martin-Rhee MM, Bialystok E (2008): The development of two types of inhibitory control in monolingual and bilingual children. *Biling Lang Cogn*, 11(1):81-93.

Meiran N (1996): Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 22(6):1423-1442.



Menon V, Adelman NE, White CD, Glover GH, Reiss AL (2001): Error- related brain activation during aGo/NoGo response inhibition task. *Hum Brain Mapp*, 12(3):131-143.

Meuter RFI, Allport A (1999): Bilingual language switching in naming. Asymmetrical costs of language selection. *J Mem Lang*, 40(1):25-30.

Miller EK, Cohen JD (2001): An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu Rev Neurosci*, 24:167-202.

Milner B (1963): Effects of different brain lesions on card sorting: The role of the frontal lobes. *Arch Neurol*, 9(1):100-110.

Mink JW (1996): The basal ganglia: focused selection and inhibition of competing motor programs. *Prog Neurobiol*, 50(4):381-425.

Mishkin S (1964): The interdependence of clinical neurology and neurophysiology an historical review of the vestibulo-ocular reflex. *McGill Med J*, 33:80-97.

Mishra RK, Hilchey MD, Singh N, Klein RM (2012): On the time course of exogenous cueing effects in bilinguals: higher proficiency in a second language is associated with more rapid endogenous disengagement. *Q J Exp Psychol*, 65(8):1502-10.

Monchi O, Petrides M, Petre V, Worsley K, Dagher A (2001): Wisconsin Card Sorting revisited: distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, 21(1):7733-41

Monchi O, Petrides M, Strafella AP, Worsley KJ, Doyon J (2006): Functional role of the basal ganglia in the planning and execution of actions. *Ann Neurol*, 59(2):257-64.

Monsell S (2003): Task switching. *Trends Cogn Sci*, 7(3):134-140.

Nee DE, Wager TD, Jonides J (2007): Interference resolution: Insights from a meta-analysis of neuroimaging tasks. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 7(1):1-17.

Nigg JT (2003): Response inhibition and disruptive behaviors: toward a multiprocess conception of etiological heterogeneity for ADHD combined type and conduct disorder early-onset type. *Ann N Y Acad Sci*, 1008:170-82.

Novick JM, Trueswell JC, Thompson-Schill SL (2005): Cognitive control and parsing: reexamining the role of Broca's area in sentence comprehension. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 5(3):263-281.

Overtom CC, Kenemans JL, Verbaten MN, Kemner C, van der Molen MW, van Engeland H, Buitelaar JK, Koelega HS (2002): Inhibition in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: a psychophysiological study of the stop task. *Biol Psychiatry*, 51(8):668-76.

Pessoa L, Rossi A, Japee S, Desimone R, Ungerleider LG (2009): Attentional control during the transient updating of cue information. *Brain Res*, 9(1247):149-58.

Peal E, Lambert W (1962): The relation of bilingualism to intelligence. *Psychol Monogr*, 76(27):1-23

Pollux PM, Robertson (2002): Reduced task-set inertia in Parkinson's disease. *C J Clin Exp Neuropsychol*, 24(8):1046-56.

Posner MI, Petersen SE (1990): The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci*, 13:25-42.

Pyers JE, Gollan TH, Emmorey K (2009): Bimodal bilinguals reveal the source of tip-of-the-tongue states. *Cognition*, 112(2):323-329.

Robbins TW (2007): Shifting and stopping: fronto-striatal substrates, neurochemical modulation and clinical implications. *Phil Trans R Soc B*, 362(1481):917-932.

Robinson AL, Heaton RK, Lehman RA, Stilson DW (1980): The utility of the Wisconsin Card Sorting Test in detecting and localizing frontal lobe lesions. *J Consult Clin Psychol*, 48(5):605-14.

Rodriguez-Fornells A, Rotte M, Heinze HJ, Nösselt T, Münte TF (2002): Brain potential and functional MRI evidence for how to handle two languages with one brain. *Nature*, 415(6875):1026-1029.

Rodriguez-Fornells A, van der Lugt A, Rotte M, Britti B, Heinze HJ, Münte TF (2005): Second language interferes with word production in fluent bilinguals: brain potential and functional imaging evidence. *J Cogn Neurosci*, 17(3):422-433.

Rodríguez-Pujadas, A., Sanjuán, A., Ventura-Campos, N., Román, P., Martín, C., Barceló, F., Costa, A., Ávila, C (2013) Bilinguals use language-control brain areas more than monolinguals to perform non-linguistic switching tasks. *Plos One*, submitted.

Rogers RD, Andrews TC, Grasby PM, Brooks DJ, Robbins TW (2000): Contrasting cortical and subcortical activations produced by attentional-set shifting and reversal learning in humans. *J Cogn Neurosci*, 12(1):142–162.

Rogers RD, Monsell S (1995): Costs of predictable switch between simple cognitive tasks. *J Exp Psychol General*, 124(2):207-231.

Rogers RD, Sahakian BJ, Hodges JR, Polkey CE, Kennard C, Robbins TW (1998): Dissociating executive mechanisms of task control following frontal lobe damage and Parkinson's disease. *Brain*, 121(5):815-842.

Rieger M, Gauggel S, Burmeister K (2003): Inhibition of ongoing responses following frontal, nonfrontal, and basal ganglia lesions. *Neuropsychology*, 17(2):272-282.

Rubia K, Cubillo A, Woolley J, Brammer MJ, Smith AB (2011): Disorder-specific dysfunctions in patients with attention-deficit/hyperactivity disorder compared to patients with obsessive-compulsive disorder during interference inhibition and attention allocation. *Hum Brain Mapp*, 32(4):601-11.

Rubia K, Halari R, Smith AB, Mohammed M, Scott S, Giampietro V, Taylor E, Brammer MJ (2008): Dissociated functional brain abnormalities of inhibition in boys with pure conduct disorder and in boys with pure attention deficit hyperactivity disorder. *Am J Psychiatry*, 165(7):889-897.

Rubia K, Overmeyer S, Taylor E, Brammer M, Williams SCR, Simmons A, Bullmore E (1999): Hypofrontality in attention deficit hyperactivity disorder ADHD during higher-order motor control: A study using fMRI. *Am J Psychiatry*, 156(6):891-896.

Rubia K, Russell T, Overmeyer S, Brammer MJ, Bullmore ET, Sharma T, Simmons A, Williams SCR, Giampietro V, Andrew CM, Williams SCR, Giampietro V, Andrew CM, Taylor E (2001): Mapping motor inhibition: Conjunctive brain activations across different versions of go/no-go and stop tasks. *Neuroimage*, 13(2):250-261.

Rubia K, Smith AB, Brammer MJ, Taylor E (2003): Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *Neuroimage*, 20(1):351-8.

Rubinstein JS, Meyer DE, Evans JE (2001): Executive control of cognitive processes in task switching. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 27(4):763-797.

Rushworth MF, Nixon PD, Eacott MJ, Passingham RE (1997): Ventral prefrontal cortex is not essential for working memory. *J Neurosci*, 17(12):4829-38.

Schneider DW, Logan GD (2006): Priming cue encoding by manipulating transition frequency in explicitly cued task switching. *Psychon Bull Rev*, 13(1):145-151.

Shallice T (1982): Specific impairments of planning. *Philos Trans R Soc Lond Biol Sci*, 298(1089):199-209.

Shon MH, Ursu S, Anderson JR, Stenger VA, Carter CS (2000). The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching. *Proc Natl Acad Sci USA*, 97(24):13448-13453.

Stocco A, Lebiere C, O'Reilly RC, Anderson JR (2012): Distinct contributions of the caudate nucleus, rostral prefrontal cortex, and parietal cortex to the execution of instructed tasks. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 12(4):611-28.

Stuss DT, Benson DF (1984): Neuropsychological studies of the frontal lobes. *Psychol Bull*, 95(1):3-28.

Stuss DT, Benson DF (1987): The frontal lobes and control of cognition and memory. In E. Perecman (Ed.) *The frontal lobes revisited*: New York

Stuss DT (1993): Assessment of neuropsychological dysfunction in frontal lobe degeneration. *Dementia*, 4(3-4):220-5. Review.

Xue G, Aron AR, Poldrack RA (2008): Common neural substrates for inhibition of spoken and manual responses. *Cereb Cortex*, 18(8):1923-1932.

Sowell ER, Thompson PM, Welcome SE, Henkenius AL, Toga AW, Peterson BS (2003): Cortical abnormalities in children and adolescents with attention-deficit hyperactivity disorder. *Lancet*, 362(9397):1699-707.

Van Heuven WJ, Dijkstra T (2010): Language comprehension in the bilingual brain: fMRI and ERP support psycholinguistic models. *Brain Res Rev*, 64(1):104-122.

Voorn P, Vanderschuren LJ, Groenewegen HJ, Robbins TW, Pennartz CM (2004): Putting a spin on the dorsal-ventral divide of the striatum. *Trends Neurosci*, 27(8):468-74. Review.

Wallesch CW (1985): Two syndromes of aphasia occurring with ischemic lesions involving the left basal ganglia. *Brain Lang*, 25(2):357-61.

Wu YJ, Thierry G. 2010. Chinese-English bilinguals reading English hear Chinese. *J Neurosci*, 30(22):7646-7651.

Ye Z, Zhou X (2009): Executive control in language processing. *Neurosci Biobehav Rev*, 33(8):1168-77.

Yehene E, Meiran N, Soroker N (2008): Basal ganglia play a unique role in task switching within the frontal-subcortical circuits: evidence from patients with focal lesions. *J Cogn Neurosci*, 20(6):1079-93.



